

# Schlussbericht vom 31.12.2021

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 19862 N

## Thema

Werkzeugbeschichtung beim Strangpressen von Bunt- und Schwermetallen

## Berichtszeitraum

01.01.2018 - 30.06.2021

## Forschungsvereinigung

Stifterverband Metalle e.V

## Forschungseinrichtung(en)

1 Technische Universität Berlin, Forschungszentrum Strangpressen

2 Technische Universität Braunschweig, Institut für Oberflächentechnik

Gefördert durch:

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben 19862 N konnte nur durch das große Interesse der Industriepartner und deren engagiertes Mitwirken im Forschungsvorhaben erfolgreich umgesetzt werden. Der Stifterverband Metalle e.V. sowie das Forschungszentrum Strangpressen (FZS) der TU Berlin und das Institut für Oberflächentechnik (IOT) der TU Braunschweig bedanken sich herzlich für die umfangreiche Unterstützung durch Sachmittel und Dienstleistungen. Darüber hinaus waren die vielen fruchtbaren Diskussionen und konstruktiven Anmerkungen in den Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses wertvoll, um die Erfahrungen der Industriepartner kontinuierlich in das Projekt einfließen zu lassen.

Die Autoren bedanken sich bei:

Dr. Hans-Achim Kuhn	Wieland-Werke AG
Dr. Dragoslav Vucic-Seele	Wieland-Werke AG
Dr. Joachim Maier	WEFA Inotec GmbH
Vu Tran	WEFA Inotec GmbH
Ralf Huber	WEFA Inotec GmbH
Andreas Hunger	BorTec GmbH & Co. KG
Robin Berger	BorTec GmbH & Co. KG
Christian Eckenbach	Marx GmbH & Co. KG
Klaus Gillmeister	Kind & Co., Edelstahlwerk, GmbH & Co. KG
Stephan Müller	Müller Engineering GmbH & Co. KG

## **Arbeitshypothese und Zusammenfassung der Arbeitspakete**

Ziel des angestrebten Forschungsvorhabens bestand darin, die thermo-mechanischen und tribologischen Vorgänge beim Strangpressen von Bunt- und Schwermetallen in der Interaktion mit boridisch modifizierten Matrizenoberflächen zu identifizieren und zu optimieren. Als Ergebnis sollten abgesicherte Herstellungsparameter für boridische Oberflächenmodifikationen von Matrizenwerkstoffen erarbeitet werden. Die verbesserten Reibungseigenschaften im Presskanal lassen eine Verschleißreduzierung erwarten, die zu einer technologisch nutzbaren Standzeiterhöhung und damit zur wirtschaftlichen Weiterentwicklung des Buntmetallstrangpressens beitragen. Das Gesamtziel des Vorhabens gliederte sich in drei Aufgabenfelder (Arbeitspakete), in denen die folgenden Arbeitshypothesen zu überprüfen waren:

### **AP 1 Boridische Oberflächenmodifikation geeigneter hochwarmfester Werkzeugwerkstoffe**

Die mittels Plasmaborieren erzeugten Eisen-, Nickel- und Kobaltboride zeigten sehr hohe Härtewerte im Bereich von 2000 – 3000 HV und geringe Adhäsionsneigung gegenüber Kupfer und dessen Legierungen. Ternäre boridische Mehrlagensysteme auf Basis von Ti-B-N, durch PACVD erzeugt, ermöglichten mittels geeigneter Variation des Schichtdesigns und der Phasenzusammensetzung die gezielte Anpassung der Schichteigenschaften an die thermische Wechselbeanspruchung unter hoher gleichzeitiger mechanischer Belastung. Mittels Magnetron-Sputtern hergestellte Schichtsysteme Ti-B-N-Si und Ti-B-N-Mo/Zr beeinflussen die Oxidationsneigung und die tribologischen Schichteigenschaften oberhalb von 800 °C positiv.

### **AP 2 Analyse und Modellierung des tribologischen und thermo-mechanischen Beanspruchungskollektivs auf Pressmatrizen beim Warmstrangpressen**

Die Analyse des Deformationsverhaltens der Werkzeugwerkstoffe unter Prozessbedingungen stellt die Grundlage für die erforderlichen elastischen und plastischen Eigenschaften der Oberflächenmodifikation dar. Mit Hilfe von hochauflösenden Reibversuchen lassen sich grundlegende Erkenntnisse über die tribologischen Vorgänge beim Hochtemperaturstrangpressen gewinnen. Angepasste FE-Modelle lassen eine zuverlässige Modellierung des thermo-mechanischen Beanspruchungskollektivs zu und ermöglichen dadurch eine geeignete Auswahl von Werkzeugwerkstoff und Verschleißschutzsystem.

### **AP 3 Analyse des Strangpressens von Kupfer und Kupferlegierungen mit boridisch oberflächenmodifizierten Matrizenwerkstoffen**

Spezifisch optimierte Oberflächenmodifikationen führen zu einer signifikanten Reduzierung des Werkzeugverschleißes. Durch Anwendung geeigneter Oberflächenmodifikationen lässt sich somit die Produktqualität verbessern. Dabei erfordern differierende Anwendungsszenarien eine angepasste Kombination von Substratwerkstoff und Schichtdesign.

**Die einzelnen Arbeitspakete wurden erfolgreich bearbeitet und das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.**

# 1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

## AP 1 Boridische Oberflächenmodifikation geeigneter hochwarmfester Werkzeuwerkstoffe

### AP 1.1 Plasmaborieren (IOT)

Im Rahmen des Projekts wurden Proben aus Warmarbeitsstahl 1.2367 (X38CrMoV5-3), Alloy 718 (2.4668) und der Kobaltbasislegierung Stellite 1 boriiert. Die Durchführung der Prozesse erfolgte zu Beginn immer wie im Projektantrag vorgesehen aus der Gasphase, während die Dissoziation des Präkursors  $\text{BCl}_3$  mit Plasmaunterstützung erfolgte. Dazu wurde das Chargierstell (kathodisch) mit gepulster Gleichspannung (pulsed DC-Betrieb) versorgt. Darüber hinaus erfolgten zahlreiche Versuche, in denen das  $\text{BCl}_3$  allein durch thermische Energie (Prozesstemperatur) dissoziiert wurde und auf das Plasma verzichtet wurde. Die Anlage zur Durchführung der Borierungen ist in Abbildung 1 dargestellt.

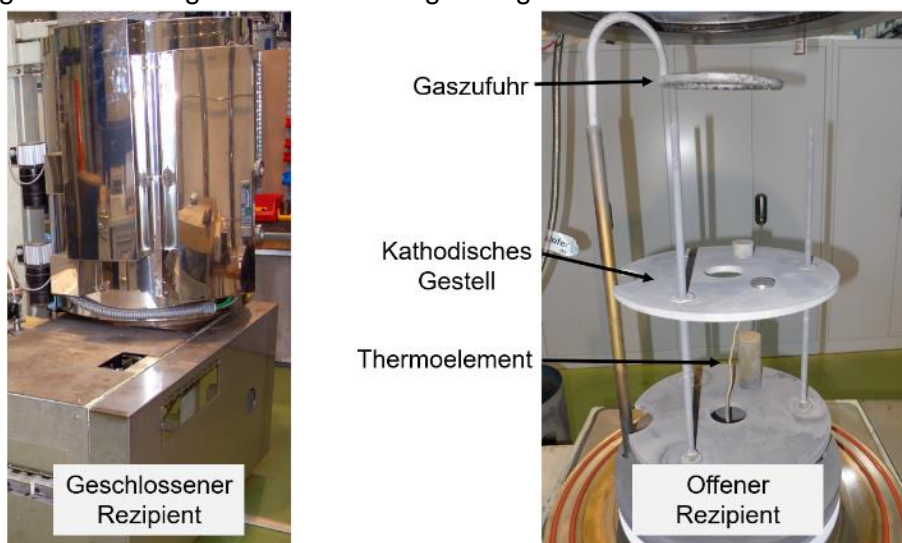


Abbildung 1: Rezipient der PlaTeG Puls Plasma zur Borierung. Links: mit geschlossenem Rezipienten und rechts: mit geöffnetem Rezipienten

Beim Borieren handelt es sich um eine thermochemische Randschichtbehandlung. Dementsprechend hängen die Ergebnisse der Borierung von der chemischen Zusammensetzung des Ausgangswerkstoffes ab, da das vorliegende Grundmaterial mit Bor angereichert wird. Die Erfahrungen des IOT und die Informationen des PA Mitglieds BorTec GmbH, die Pastenborierungen anstelle von Gasborierungen durchführen, stimmen an dieser Stelle überein: Bei niedriglegierten Stählen, Nickelbasislegierungen und Kobaltbasislegierungen lassen sich mit dem Boriervorgang sehr gute und reproduzierbare Ergebnisse erzeugen. Der Warmarbeitsstahl 1.2367 ist hoch legiert und weist eine ungünstige chemische Zusammensetzung hinsichtlich der Borierbarkeit auf. Da in der Strangpressindustrie die Strangpressmatrizen zumeist aus 1.2367 oder ähnlichen Warmarbeitsstählen gefertigt werden, besteht hier ein hoher Forschungsaufwand und ein erhöhtes Projektrisiko. Im Rahmen des Projekts wurden mehr als 50 Borierversuche am 1.2367 durchgeführt. Zu Beginn wurden die ‚klassischen‘ Parameter variiert, d.h. die Chargentemperatur, der Massenstrom der Präkursoren und dessen Zusammensetzung, der Druck im Rezipienten ( $p = 1$  bis 10 mbar), sowie die Plasmaparameter. Die daraus resultierenden Ergebnisse waren nicht zufriedenstellend. Eine vertiefte Analyse der Ergebnisse ergab, dass die Dicke und das optische Erscheinungsbild zweier 1.2367 Proben, die nah beieinander chargiert

wurden, heterogen ist. Dieser Effekt lässt sich stellenweise auf einer einzelnen Probe erkennen, obwohl deren Oberfläche mit einem Durchmesser von  $\varnothing 34$  mm relativ gering ist. Durch die schwankenden Ergebnisse, die bereits bei kurzer Distanz auftreten, können eine Reihe von Parametern als verantwortlich ausgeschlossen werden. Das betrifft z.B. den Druck im Rezipienten, die Bauteiltemperatur und die Glimmentladung. Die Forschungseinrichtungen identifizierten deshalb den Zu- und Abstrom der Prozessgase, im weiteren Fluktuation genannt, als primären Einflussfaktor. Das zugrundeliegende Prinzip der chemischen Gasphasenabscheidung (Chemical Vapor Deposition, CVD) ist in Abbildung 2 dargestellt. Im Falle des Plasmaborierens wird die Dissoziation durch die Glimmentladung unterstützt und das B diffundiert in die Oberfläche des Substrats ein. Dabei kann die Prozesstemperatur deutlich gesenkt werden, da die Glimmentladung die Aufspaltung der Moleküle unterstützt. Bei der rein thermischen CVD wird der in der Abbildung 2 mit „3. Chemische Reaktion“ beschriebene Vorgang ausschließlich durch die Prozesstemperatur ermöglicht, weshalb je nach Prekursor hohe Temperaturen notwendig sind.

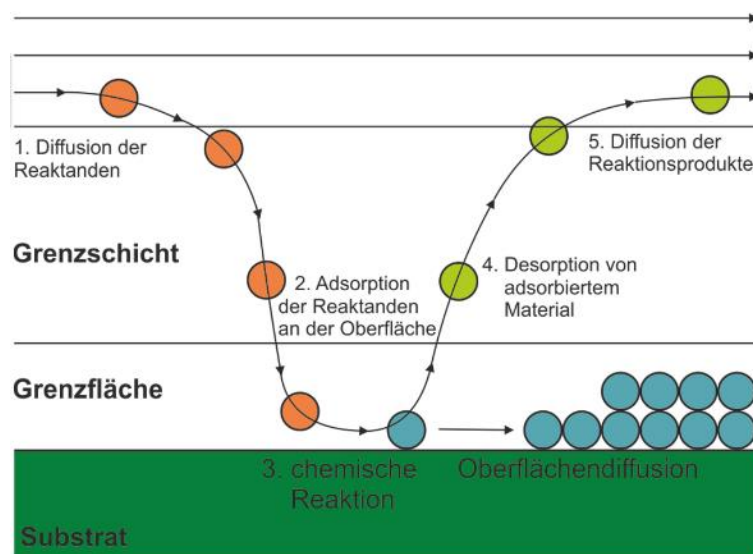


Abbildung 2: Diffusion von  $\text{BCl}_3$  und  $\text{H}_2$  Molekülen (orange) an die Probenoberfläche. Es sammelt sich diffusionsfähiges B (blau) an der Oberfläche und  $\text{HCl}$  (grün) wird als Abgas aus dem Rezipienten geleitet

Anhand von Abbildung 2 wird deutlich, dass sowohl der zuverlässige Zustrom an Reaktanden ( $\text{BCl}_3$  und  $\text{H}_2$ ) als auch der stetige Abgang der Diffusionsprodukte ( $\text{HCl}$ ) gewährleistet werden muss. Als Beispiel für eine Prozessführung, in der heterogene Ergebnisse vorzufinden sind, kann angeführt werden, dass teilweise Stellen permanent mit „frischem“  $\text{BCl}_3$  und  $\text{H}_2$  versorgt werden, wodurch die Abscheidung von diffusionsfähigem B schnell von statten geht und dicke Borierzonen erzeugt werden, während im gleichen Prozess an anderen Stellen statt  $\text{BCl}_3$  und  $\text{H}_2$  überwiegend  $\text{H}_2$  und  $\text{HCl}$  ankommen. Die Borierzone wird entsprechend dünn, wenn kaum  $\text{BCl}_3$  an die Stellen gelangt.

Aus den Wirkmechanismen des zuvor beschriebenen Sachverhalts wird offensichtlich, dass ausschließlich bauliche Maßnahmen die Versorgung der Oberfläche mit Reaktanden beeinflussen können. Dabei kommen drei Gesichtspunkte zum Tragen:

1. Die Veränderung der Gaszufuhr in den Rezipienten. Diese wird durch eine Gassammelleitung über ein Gasrohr mit dünnen Bohrungen als Austrittslöcher in den Rezipienten gewährleistet. Eine Homogenisierung der Ergebnisse kann nur erfolgen, indem die Lage der Austrittslöcher und das Strömungsprofil im Rezipienten angepasst wird. Die zu Beginn des Projekts bestehende Lösung ist in Abbildung 3 a abgebildet. Dort

befinden sich die Austrittslöcher im rot umkreisten Ring und strömen die Proben der obersten Chargierebene direkt an. Um eine direkte Anströmung einzelner Flächen im Rezipienten zu verhindern, wurde ein Prallblech (vgl. Abbildung 3 b) zwischen Austrittslöchern und Chargierebene montiert. Anstelle einer zentral von oben erfolgenden Gaszufuhr wurde ein Aufbau konzipiert, konstruiert und baulich umgesetzt, bei dem die Gaszufuhr auf unterschiedlichen Ebenen und zentral aus der Mitte erfolgt (siehe Abbildung 3 c). Dieser Aufbau ist einer anderen PACVD Anlage nachempfunden, in der die Probenbehandlung sehr homogen möglich ist. Dieser Aufbau wurde ebenfalls um ein Prallblech erweitert, um eine direkte Anströmung zu unterbinden (siehe Abbildung 3 d).

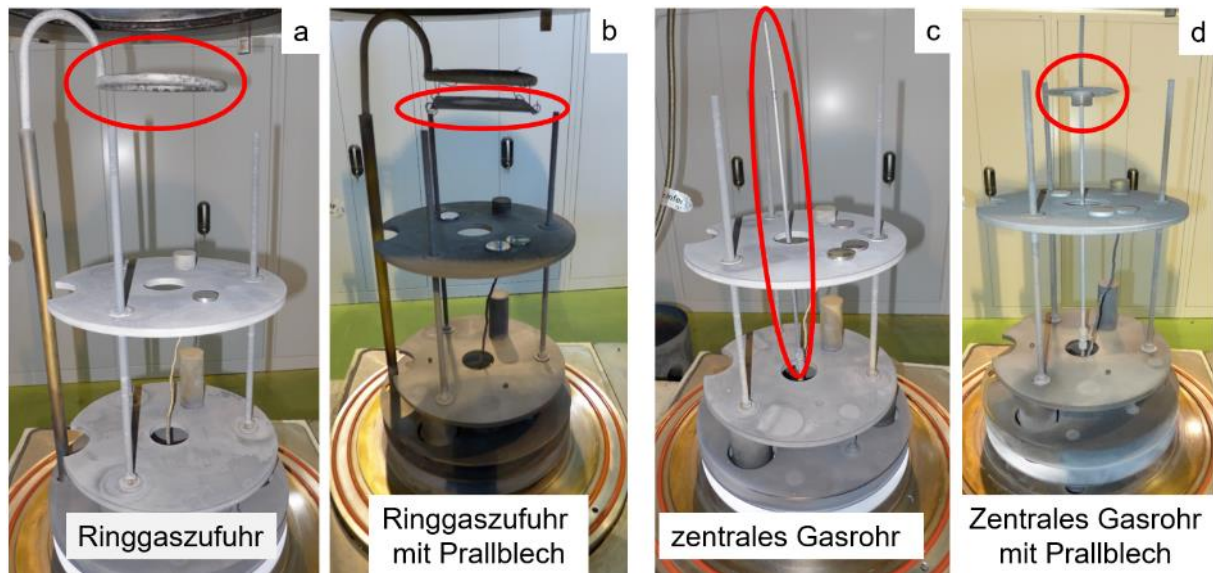


Abbildung 3: a und b Ringgaszufuhr mit und ohne Prallblech und c und d zentrales Gasrohr mit und ohne Prallblech

2. Die Homogenität der Ergebnisse kann durch das Strömungsprofil in der Kammer beeinflusst werden. Die Chargierebenen die in Abbildung 3 a-d zu erkennen sind, wurden innerhalb des Projekts gefertigt, um das Strömungsprofil zu verbessern. Zusätzlich wurden Gewindestangen genutzt, um die oberste Chargierebene, die auf Muttern aufgelegt wird, höhenverstellbar zu gestalten. Dadurch kann die Entfernung zwischen oberer Chargierebene und Ringgasdusche nach Wunsch eingestellt werden.
3. Die Platzierung der Gasabfuhr aus dem Rezipienten stellt einen weiteren Faktor für die Beeinflussung der Borierung dar. Diese befindet sich zentral am Boden in Form eines Rohres das zur Vakuumpumpe führt. Es wurde ein Konzept entwickelt, mit dem unter Nutzung der Ringgasdusche die durch ein mit Bohrungen versehenes Rohr in der Mitte erfolgt, sodass die Zu- und Abfuhr der Prozessgase stark verändert wird. Aufgrund eines hohen Fertigungsaufwands und der schwierigen Umsetzbarkeit sowie der Gefahr, dass eine große Menge  $\text{BCl}_3$  direkt von der Gaszufuhr in die Gasabfuhr gelangt ohne im Prozess umgesetzt zu werden, wurde das Konzept nicht umgesetzt. Zudem könnte die geringe Distanz zwischen kathodischem Gestell und anodischem Gasabfuhrzylinder die Glimmentladung massiv beeinflussen.

Im Laufe des Forschungsvorhabens wurden die verschiedensten Kombinationen an Versuchsaufbauten und Prozessparameter variiert. Das Parameterfenster, in dem die Borierung erfolgreich durchgeführt werden kann, liegt in eng umfassten Grenzen. Dies liegt zum Teil daran, dass die Chargentemperatur in der vorliegenden Versuchsanlage auf  $750\text{ °C}$  begrenzt ist.

Trotzdem ist es gelungen den Warmarbeitsstahl mit einer dicken, gleichmäßigen und porenfreien Borierzone zu versehen, wodurch die Machbarkeit einer erfolgreichen Gasborierung des Stahls 1.2367 gezeigt werden konnte. Dies ist in Abbildung 4 in einer Querschnittansicht dargestellt.

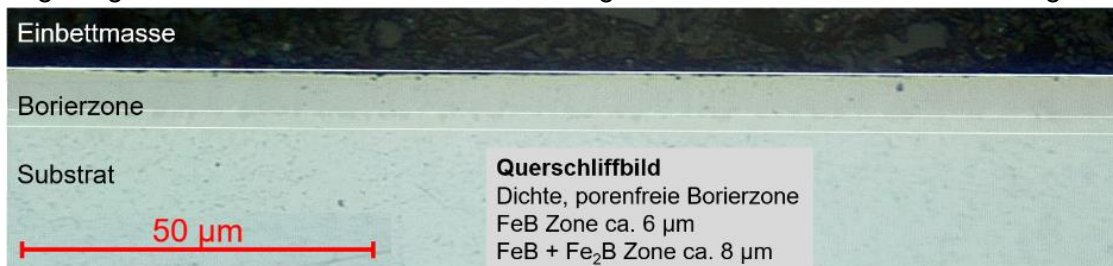


Abbildung 4: Querschnittansicht einer boriierten Probe aus 1.2367. Die weißen Linien wurden zur Vermessung am Lichtmikroskop eingezeichnet.

Die Borierzone ist zwar gleichmäßig eingestellt, jedoch konnte dieser Prozess nicht erfolgreich reproduziert werden. Das bedeutet, dass trotz der hohen Anzahl von über 50 Borierversuchen lediglich die Machbarkeit gezeigt werden konnte, eine Applikation auf Werkzeugoberflächen allerdings durch die geringe Robustheit des Prozesses nicht sinnvoll erschien. Weitere Arbeiten zur Entwicklung eines stabilen Borierprozesses mit reproduzierbaren Ergebnissen würden voraussichtlich eine Anlage erfordern, die bei höheren Temperaturen Borieren kann. Dies wurde an einer anderen Anlage des IOTs (850 °C statt 750 °C) durchgeführt und die die Resultate stellen eine geringe Verbesserung dar.

Zusammenfassend war die Borierung des 1.2367 der Kern des Projekts. Hier findet sich für die Partner des projektbegleitenden Ausschusses im Erfolgsfall das größte wirtschaftliche Potential wieder. Das liegt daran, dass der 1.2367 als Matrizenwerkstoff im Warmstrangpressprozess von Buntmetall weit verbreitet ist. So kann ein Werkzeug, dessen Fertigung und Kosten bekannt sind, durch einen zusätzlichen Prozessschritt, das Borieren, deutlich erhöhte Standmengen werden. Entsprechend gering ist die Umstellung in der Werkzeugfertigung und die gesamte Kostenkalkulation. Gleichzeitig birgt die Entwicklung eines Gasborierprozesses am 1.2367 erhebliche Risiken, da bereits von etablierten Pastenborierprozessen bekannt ist, dass der Werkstoff schwer zu borieren ist. Diese Einschätzung wurde von einem Mitglied des projektbegleitenden Ausschusses geteilt. Entsprechend ist der Nachweis der Machbarkeit als Endergebnis einer drei Jahren kurzen Förderperiode zufriedenstellend.

Im Gegensatz dazu waren die Borierversuche am Alloy 718 und Stellite 1 deutlich erfolgreicher. Der Alloy 718 wird im lösungsgeglühten Zustand angeliefert und im Borierprozess sowohl thermochemisch behandelt als auch gehärtet. Das ist darin begründet, dass im Niederdruckprozess sowohl die Borierung als auch die Härtung durch Ausbildung von Ausscheidungen bei einer Werkstofftemperatur von 720 °C erfolgen kann. Dieses Verfahrensprinzip ist in Abbildung 5 anhand des Temperaturverlaufs dargestellt.

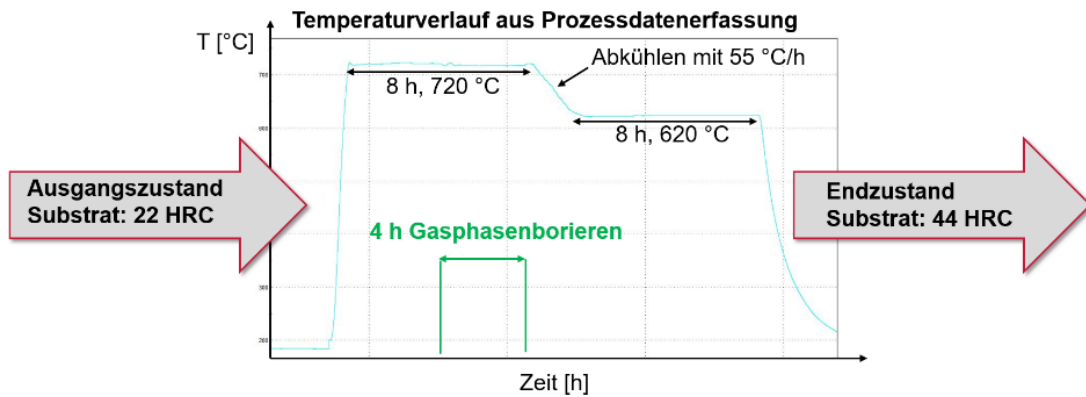


Abbildung 5: Schematischer Prozessablauf beim Borieren der Legierung Alloy 718 zur simultanen Härtung und Oberflächenbehandlung.

Die Ausscheidungshärtung des Substratmaterials, das nicht durch eindiffundierendes Bor beeinflusst wird, erfolgt über die Temperatur des Werkstoffs. Im Detail bedeutet das, dass nach dem Aufheizen auf 720 °C die Temperatur für 8 h gehalten wird. Im Anschluss wird die Temperatur mit einer Geschwindigkeit von 55 °C/h auf 620 °C gesenkt und die Temperatur wieder für 8 h gehalten. In einem Zeitraum von 4 h wird während des Halteschritts bei 720 °C eine BCl<sub>3</sub>-haltige Atmosphäre im Rezipienten eingestellt und die Oberfläche der Probe boriiert (vgl. Abbildung 2). Das Ergebnis ist ein Substratmaterial, dessen Härte von 22 HRC auf 44 HRC steigt. Gleichzeitig bildet sich an der Oberfläche eine 12 µm dicke, dichte Borierzone aus, wie in Abbildung 6 zu erkennen ist.

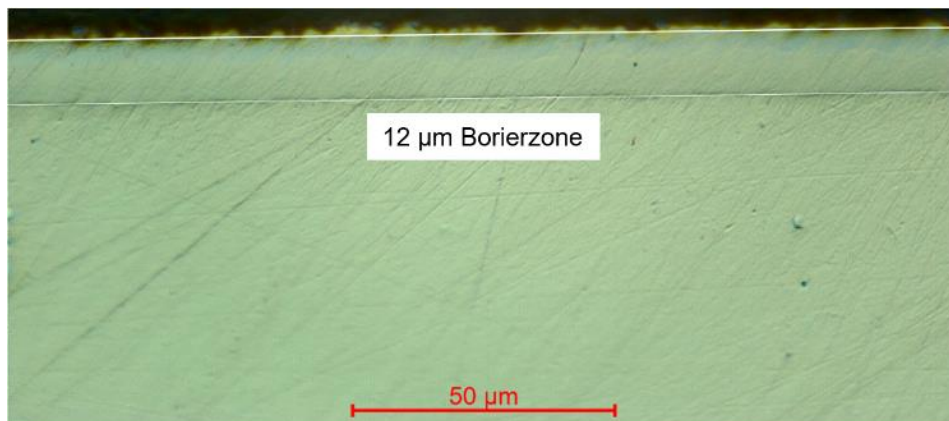


Abbildung 6: Querschnittsaufnahme einer boriierten Alloy 718 Probe. Die weißen Linien wurden zur lichtmikroskopischen Messung der Schichtdicke eingezeichnet.

Darüber hinaus wurde der Werkstoff Stellite 1 boriiert. Die Ergebnisse an der Borieranlage des IOT, die bei Chargentemperaturen von bis zu 750 °C arbeiten kann, waren nicht zufriedenstellend, da sich eine sehr dünne Borierzone ausbildet, die mit einem Lichtmikroskop im Querschliff nicht auszumessen ist. Dieser Effekt wurde auch bei deutliche längeren Borierzeiten unverändert festgestellt. Die Erklärung liegt voraussichtlich darin, dass zwar die Dissoziation des BCl<sub>3</sub> erfolgreich gewesen ist, da diese bei den anderen Werkstoffen bei gleichen Prozessparametern stattgefunden haben muss, jedoch die Diffusion des an der Oberfläche angereicherten Bors nicht stattgefunden hat. Die Fa. BorTec hat auf Basis dieser Ergebnisse geäußert, dass der Borierprozess bei diesem Werkstoff mit dem Pastenborierverfahren bereits lange erprobt ist und das Bor im Substrat bei höheren Temperaturen deutlich besser diffundiert. Das bedeutet, dass die Prozesstemperatur von 750 °C zwar das Spendermedium BCl<sub>3</sub> an der



Oberfläche dissoziiert, das an der Oberfläche angereicherte Bor allerdings thermisch nicht aktiv genug ist und nur extrem langsam in die Oberfläche diffundiert. Zusätzlich reicht die Temperatur voraussichtlich nicht aus, um die thermischen Schwingungen des Metallgitters des Stellite 1 Werkstoffs soweit zu erhöhen, dass die Gitterabstände ausreichend groß sind, um Bor eindiffundieren zu lassen. Daraufhin wurden die Versuche an einer ähnlichen Borieranlage des IOT bei Temperaturen von 850 °C boriiert. Daraus resultierte eine Borierzone von 10 µm, wie es in Abbildung 7 in der Querschnittsansicht zu erkennen ist. Dementsprechend wurde die wissenschaftliche Erkenntnis gewonnen, dass der Borierprozess im Beispiel Stellite 1 massiv von der Temperatur abhängig ist und eine Temperaturgrenze nicht unterschritten werden darf, die im Bereich 750 °C – 850 °C liegt, damit der Prozess wirtschaftlich-technisch erfolgreich ist.

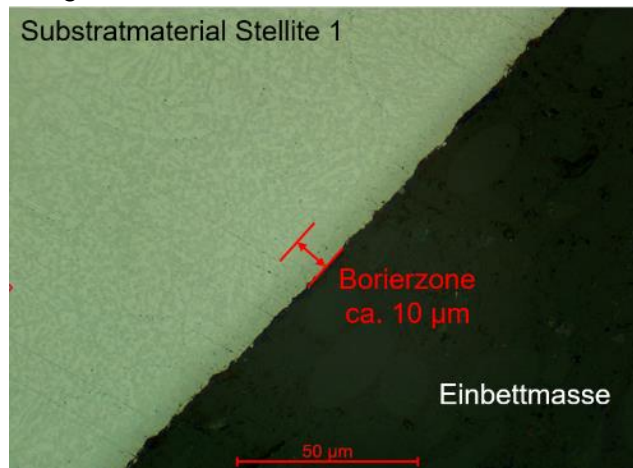


Abbildung 7: Querschnittsaufnahme einer boriierten Stellite 1 Probe mit ca. 10 µm dicker Borierzone.

Zusammenfassend konnten die Nickel- und Kobaltbasislegierung mit einer borhaltigen Hartstoffschicht versehen werden, die aufgrund der thermochemischen Diffusionsbehandlung bessere Haftungseigenschaften aufweist als Beschichtungen. Dies ist damit begründet, dass Beschichtungen eine scharfe Grenzfläche zwischen Substrat und Schicht aufweisen, die in anderen Anwendungen häufig den Ausgangspunkt für etwaige Delamination der Schicht darstellt. Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist das Gasborieren bei Alloy 718 am interessantesten, da der Werkstoff günstiger ist als der Stellite 1. Zusätzlich kann die Oberflächenbehandlung mit der Ausscheidungshärtung des Substrats einhergehen, wodurch Synergieeffekte auftreten. Dies sind Einsparungen in Behandlungszeit, Energie und dadurch bedingte Fertigungskosten.

### AP 1.2 PACVD (IOT)

Der Warmarbeitsstahl 1.2367 wurde mit dem PACVD Beschichtungsverfahren beschichtet. Die Werkzeughersteller und Presswerke fordern von der Forschung, dass die Optimierungen der Verschleißbeständigkeit der Werkzeugoberfläche durch eine Beschichtung am bereits bekannten Werkstoff durchgeführt werden. Dies hängt zum einen mit den bekannten Einkaufspreisen und umfangreichen Erfahrungen der Unternehmen zusammen. Zum anderen stehen die Notlaufeigenschaften im Fokus. Sollte die neu entwickelte Schicht wider Erwarten nach kurzer Zeit versagen, so befindet sich darunter der im Einsatz erprobte Warmarbeitsstahl.

Die Proben wurden mit dem Verfahren der plasmaunterstützten chemischen Gasphasenabscheidung (Plasma Assisted Physical Vapor Deposition, PACVD) abgeschieden. Im Projektantrag wurden in diesem AP mehrere Varianten von Ti-B-N Mehrlagensystemen vorgesehen (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Beschichtungsmatrix PACVD (Ti-B-N Mehrlagenschichtsystem)

Variante	Aufbau	Lagenzahl	Borgehalt / Stickstoffgehalt <sup>1)</sup>
V1	Gradient TiN -> TiB <sub>2</sub>	1	0 -> 60 / 25 -> 10 at.-%
V2	Mehrlagensystem	8	0 -> 60 / 25 -> 10 at.-%
V3	Mehrlagensystem	8	0 -> 40 / 35 -> 10 at.-%
V4	Mehrlagensystem	25	0 -> 60 / 25 -> 10 at.-%

<sup>1)</sup>: Qualitatives Phasenverhältnis nc-TiN: nc-TiB<sub>2</sub> / „->“ = gradierter Übergang

Diese Schichten weisen eine Nanokompositstruktur auf. Das bedeutet, dass die Körner im Durchschnitt nur wenige Nanometer (~3-10 nm) groß sind. Daraus resultieren beispielsweise hervorragende mechanische Eigenschaften, da der Hall-Petch Effekt ausgenutzt wird und eine hohe Härte (> 40 GPa) in Kombination mit einer hohen Festigkeit erreicht werden kann. Die TiB<sub>2</sub> Phase ist dafür bekannt, dass eine besonders hohe chemische Stabilität vorliegt. Entsprechend basiert auch dieser Ansatz auf reaktionsträgen boridischen Verbindungen, die im tribologischen System das Anhaften von Kupfer oder Messing unterbinden. Nach Angaben aus der Literatur liegt die Oxidationsbeständigkeit der Ti-B-N Schichten bei ~650 °C. Aus diesem Grund wurde eine Neuentwicklung des IOT, das Schichtsystem Ti-Si-B-C-N, nach Absprache mit dem PA in das Projekt aufgenommen. Diese Schichten sind ebenfalls Nanokompositsschichten und weisen deshalb zur Ti-B-N Schicht vergleichbare mechanische Eigenschaften auf, sind aber bis zu 900 °C oxidationsbeständig. Auch hier werden boridische Phasen wie amorphes (a-) TiB<sub>2</sub> oder a-BN gebildet, die potentiell die Adhäsionsneigung reduzieren können.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Beschichtungsversuche beschrieben. Die Ti-B-N Schichten wurden mit einer Schichtdicke von 1-3 µm appliziert und wiesen einen mehrlagigen Aufbau aus. Dieser Schichtaufbau ist in Verschleißschutzanwendungen häufig vertreten, da etwaige Risse in der Schicht sich nicht durchgängig in die Tiefe fortsetzen, sondern an der Grenzfläche zwischen den einzelnen Lagen der Schicht abgelenkt werden. Dadurch wird der Schaden an der Schicht reduziert und der Verschleißfortschritt verlangsamt. Die Schichten weisen Härtewerte von bis zu 46 GPa Universalhärte bei gleichzeitig guter Schichthftung auf. Die Schichten wurden bereits Jahre vor dem Projekt entwickelt und weisen einen hohen Reifegrad (bezüglich ihrer Reproduzierbarkeit, Robustheit der Prozesse) auf. Vordergründig stehen hier die Untersuchungen zur Eignung als Verschleißschuttschicht auf Strangpressmatrizen im Fokus, da die Schichten in späteren APs hinsichtlich Oxidationsverhalten und plastischem Deformationsvermögen getestet werden.

Eine weitere PACVD Schicht ist die Ti-Si-B-C-N Schicht, die als gradierte Schicht aufgebaut ist. Das bedeutet, dass zu Beginn des Beschichtungsprozesses reines TiN abgeschieden wurde und sukzessive steigende Massenströme an BCl<sub>3</sub> und Si(CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub> in den Rezipienten geleitet wurde. Dadurch wird in der Schicht ein Gradient in der Phasenkomposition erzeugt, der bei TiN anfängt und sich zu Ti-Si-B-C-N ändert. Der innovative Charakter im Vergleich zu Ti-B-N besteht darin, dass durch Anteile von ca. 10 at.-% Silizium die Oxidationsbeständigkeit durch Bildung von Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> steigen soll, während der Kohlenstoff in tribologischen Anwendungen die Reibung durch a-C Phasen reduzieren soll. Die Schichten weisen eine Härte von bis zu 39 GPa und eine gute Haftung am Substrat auf.

### AP 1.3 PVD (IOT)

Analog zu AP 1.2 wurden Proben aus dem Warmarbeitsstahl 1.2367 mit einer borhaltigen Schicht versehen. In diesem Fall ist das zugrundeliegende Verfahren der Schichtabscheidung die physikalische Gasphasenabscheidung (Physical Vapor Deposition, PVD). Bei den Schichtsystemen handelt es sich um Ti-Zr-B-N und Ti-Mo-B-N. Die Durchführung der Arbeiten

verzögerte sich aufgrund der hohen Auslastung der Beschichtungsanlage in Kombination mit technischen Schwierigkeiten im Anlagenbetrieb. Sowohl die Ti-Zr-B-N als auch die Ti-Mo-B-N Schichten wiesen eine schwache Anhaftung am Substrat auf. Möglicherweise besteht hier ein Zusammenhang mit einer instabilen Plasmazustandführung.

Nach Rücksprache mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses waren PVD Schichten für das Projekt von untergeordneter Bedeutung. Zwar lassen sich durch Anpassung der Prozessparameter voraussichtlich Schichten applizieren, die von den mechanischen und thermischen Eigenschaften mit den in AP 1.1 und AP 1.2 durchgeführten Oberflächenmodifikationen vergleichbar sind, allerdings weist das PVD Verfahren den Nachteil der „Sichtlinienproblematik“ auf. Im Falle einer Strangpressmatrize ist der Radius am Presskanaleinlauf am stärksten tribologisch belastet. Darüber hinaus ist die gleichmäßige Beschichtung des Strangpresskanals wichtig. Durch das Sputtern aus Targetmaterialien sind diese Bereiche der Strangpressmatrizen schlecht zu erreichen, weshalb es zu Nachteilen in der Schichtdicke und Mikrostruktur kommt. Auf Basis der guten und aussichtsreichen Ergebnisse aus AP 1.1 und AP 1.2 wurde beschlossen den Ansatz der PVD Beschichtungen nicht weiter zu verfolgen und die Ressourcen des Projekts verstärkt für die Weiterentwicklung von Borierungen und PACVD Beschichtungen zu nutzen.

#### **AP 1.4 Analyse der Oberflächenstruktur und des mechanisch-tribologischen Verhaltens (IOT)**

Im Rahmen des Projekts wurden sehr viele Querschliffpräparationen angefertigt und die Querschnittsansichten lichtmikroskopisch untersucht. Dies gilt vorwiegend für die Borierzone, da diese in der Größenordnung 5-20 µm liegen und mit optischer Vergrößerung noch gut erkennbar sind. Im Falle der Oberflächenbeschichtungen kam das Kalottenschliffverfahren nach DIN EN ISO 26423 zum Einsatz, da die Schichten mit 2-4 µm Schichtdicke nicht gut im Lichtmikroskop kenntlich gemacht werden können und der Präparationsaufwand bei Querschliffen deutlich höher ist. Die Schichthaftung wurde mit der Rockwell-Eindringprüfung zur Bewertung der Haftung von keramischen Schichten nach DIN EN ISO 26443 bewertet. Alle Oberflächenmodifikationen wurden hinsichtlich ihrer Phasenzusammensetzung analysiert, indem Röntgendiffraktometrie (XRD) durchgeführt wurde. Bei den Beschichtungen wurden die chemischen Zusammensetzungen mittels Elektron-Probe-Micro-Analysis (EPMA) ermittelt. Auf die Ermittlung der chemischen Zusammensetzungen der boriierten Proben wurde verzichtet, da die Proben aus dem jeweiligen Substratmaterial (1.2367, Alloy 718 und Stellite 1) + eindiffundiertes Bor bestehen. Durch die XRD Messungen sind zudem die boridischen Phasen bereits identifiziert worden.

Härtemessungen mit geringen Eindringtiefen (<10% Schichtdicke) wurden durchgeführt, um die Härte und den E-Modul der Schichten zu ermitteln. Dies geschah entweder auf der Oberfläche oder im Querschliff. Im Querschliff ließ sich zudem eine Härte-Tiefen-Profil (NHT) erstellen, um die Abnahme der Härte von Borierzone zu Substrat nachzuvollziehen. Ein solches NHT ist in Abbildung 8 auf der linken Seite eingezeichnet. Auf der rechten Seite ist ein Querschliffbild der Probe abgebildet, damit die Härtewerte und Borierzone miteinander in Korrelation gesetzt werden können. Zu erkennen ist eine hohe Härte von über 2.000 HV in der Borierzone sowie ein steiler Abfall der Härte auf das Niveau des Substratwerkstoffs (ca. 470 HV).

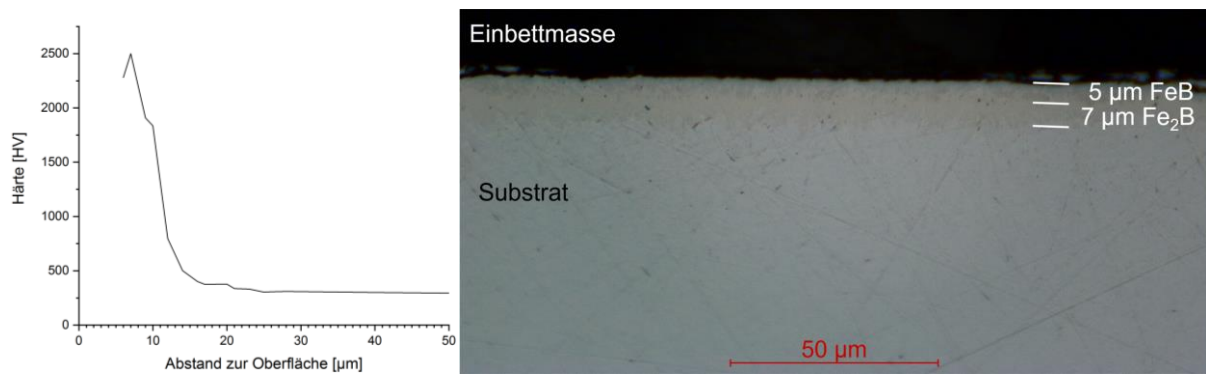


Abbildung 8: links: Härte-Tiefen-Profil eines boriierten 1.2367 Warmarbeitsstahls und rechts: zugehöriges Querschliffbild mit Angabe der Dicke der Borierzone

Im Allgemeinen wurden für die Oberflächenmodifikationen aus AP1.1 und AP1.2 gute Haftungseigenschaften, Schichtdicken von 2-20 µm und eine Schichthärte von 1.500-4.000 HV ermittelt. Zusammen mit den Erkenntnissen aus chemischer Zusammensetzung und Phasenzusammensetzung ist zu allen Modifikationen ein umfangreiches Verständnis der mechanischen Eigenschaften aufgebaut worden.

### AP 1.5 Untersuchung des Oxidations- und Zersetzungsverhaltens unter Prozessbedingungen (IOT)

Über die im Forschungsantrag beschriebenen Versuche hinaus wurde zusätzlich die Oxidationsbeständigkeit der Schichten in Temperversuchen ermittelt. Hierzu wurden die Proben an Luft für 30 min bzw. 60 min bei 850 °C bzw. 900 °C in einen Temperofen gelegt. Die Abkühlung erfolgt durch Luftabschreckung bei Raumtemperatur durch Entnahme der Proben aus dem Ofen. Im Vergleich zur Abschreckung in Medien wie Öl oder Wasser ist die Abkühlung verhältnismäßig langsam erfolgt. Die Ergebnisse zeigen, dass die boriierten Proben aus Alloy 718 und Stellite 1 den Bedingungen gut standhalten. Dies ist in Abbildung 9 und Abbildung 10 im Querschnitt gut zu erkennen.

Die boriierte Probe aus Alloy 718 weist eine dünne Oxidschicht auf. Im Vergleich zur Gesamtschichtdicke ist der Fortschritt der Oxidation als gering zu bewerten.

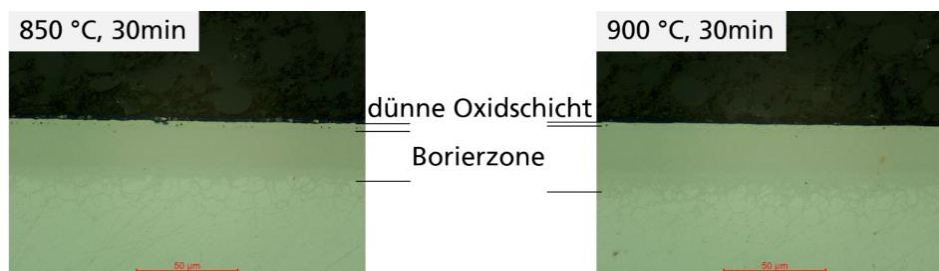


Abbildung 9: Querschnittsansicht einer boriierten Alloy 718 Probe, die im Ofen für 30 min bei 850 °C (links) und 30 min bei 900 °C (rechts) an Luft oxidierte.

Bei der Stellite 1 Probe ist keine Oxidschicht erkennbar (vgl. Abbildung 10), wohingegen eine dichte und augenscheinlich unbeschädigte Borierzone zu erkennen ist.

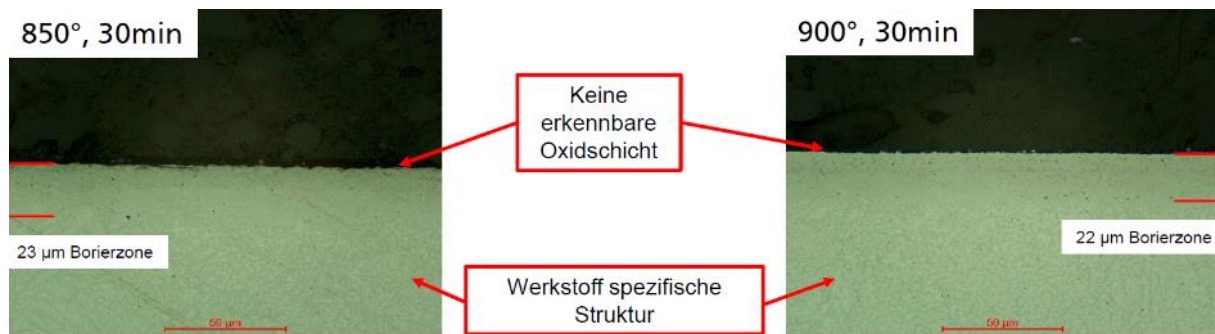


Abbildung 10: Querschnittansicht einer borierten Stellite 1 Probe, die im Ofen für 30 min bei 850 °C (links) und 30 min bei 900 °C (rechts) an Luft oxidierte.

Der borierte 1.2367 wies starke Oxidationserscheinungen auf, da die Schicht nicht ausreichend dicht war (hohe Porigkeit) und Stahl und Luft in direktem Kontakt standen. Die Oxidation des Stahls führte zur Ausbildung einer Oxidschicht zwischen Stahl und Borierzone, wodurch der Abstand zur Stahloberfläche stetig stieg. Dies ist in der Querschnittansicht in *Abbildung 11* erkennbar.

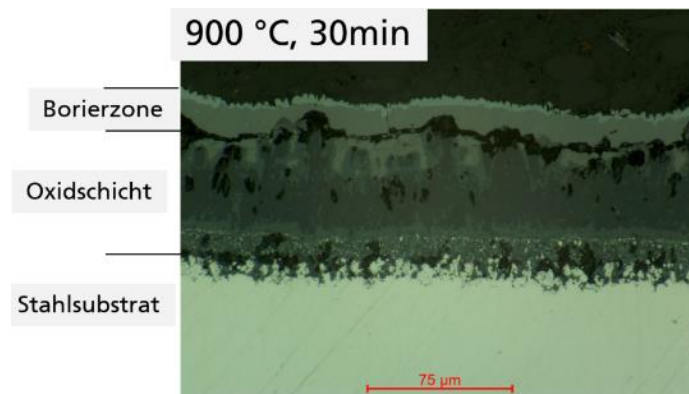
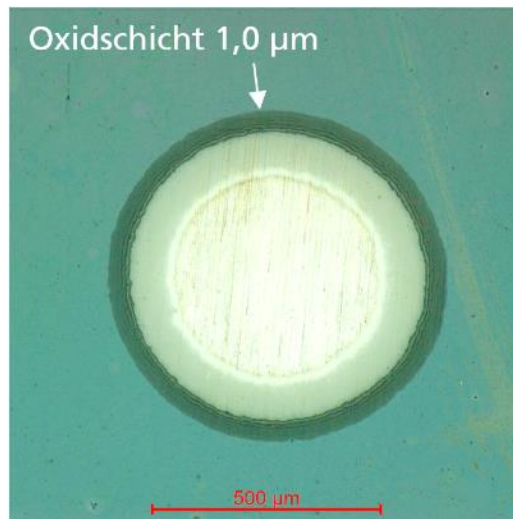


Abbildung 11: Querschnittansicht einer borierten 1.2367 Probe, die im Ofen für 30 min bei 900 °C an Luft oxidierte.

Da die Schichtdicken der PACVD-Beschichtungen deutlich dünner sind als die Verbindungsschichten der borierten Proben, wird die Dicke der Gesamtschicht und der Verbindungsschicht durch das Kalottenschliffverfahren bestimmt. In *Abbildung 12* ist eine solche Kalotte in einer Ti-Si-B-C-N beschichteten Probe zu erkennen. Die Gesamtschichtdicke vor der Oxidation der Probe betrug ca. 3 µm. Nach der Oxidation besteht die Schicht zum einen aus unbeeinflusster Ti-Si-B-C-N Schicht und zum anderen aus oxidierte Schicht die vorwiegend aus TiO<sub>2</sub> besteht, welches in XRD Messungen nachgewiesen wurde. Entsprechend ist die Oxidation trotz einer 30-minütigen Auslagerung an Luftatmosphäre bei 850 °C nur langsam vorangeschritten und die Schicht nicht vollständig oxidiert. Damit ist eine sehr hohe Oxidationsbeständigkeit der Schicht gegeben.



*Abbildung 12: Kalotte in einer Ti-Si-B-C-N Beschichtung. Die Probe wurde bei 850 °C für 30 Minuten in Luftatmosphäre oxidiert.*

Aus zahlreichen Vorversuchen und diversen Literaturquellen geht hervor, dass die Ti-B-N Schicht eine Oxidationsbeständigkeit bis 650 °C aufweist. Dies wurde auch im Rahmen des Projekts nochmal bestätigt, jedoch nicht in den hier beschriebenen Temperversuchen. Auf die Temperversuche wurde deshalb verzichtet.

## AP 2 Ermittlung und Modellierung des thermo-mechanischen Belastungskollektivs beim Warmstrangpressen von Buntmetallen

### AP 2.1 Ermittlung metallphysikalischer Materialparameter der Presswerkstoffe und der Matrizenwerkstoffe (FZS)

- Durchgeführte Arbeiten

An den vier ausgewählten Werkzeugwerkstoffen Warmarbeitsstahl 1.2367, Sonder-Warmarbeitsstahl CS1, Nickelbasislegierung 2.4668 (Alloy 718) und Kobaltbasislegierung 2.4775 (Stellite 1) wurden Warmdruckversuche unter den Prozessbedingungen des Buntmetallstrangpressens durchgeführt. In einem Temperaturbereich von 500 °C – 1.000 °C wurde die Fließspannung der Werkstoffe bei einer Dehnrates von 0,005 1/s ermittelt.

- Erzielte Ergebnisse

Die Daten der Warmdruckversuche wurden ausgewertet und als Grundlage für die numerischen Untersuchungen der Werkzeugdeformation in die FEM-Software implementiert. Hierfür wurde speziell die Stauchgrenze der Werkstoffe in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt (siehe Abbildung 13). Das angestrebte Ziel des APs wurde in vollem Umfang erzielt.

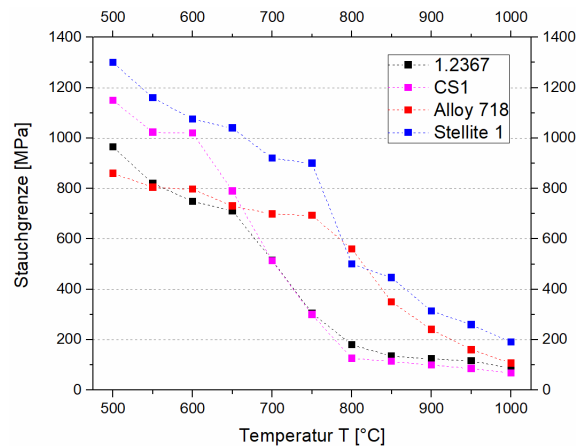


Abbildung 13: Stauchgrenzen der untersuchten Werkzeugwerkstoffe in Abhängigkeit der Temperatur.

### AP 2.2 Ermittlung metallphysikalischer Materialparameter der Presswerkstoffe (FZS)

- Durchgeführte Arbeiten

Analog zu den Werkzeugwerkstoffen wurden die Umformkennwerte der Presswerkstoffe durch Warmdruckversuche bestimmt. Für Kupfer (Kupfer-DHP, CW024A) wurden Versuche im Temperaturbereich 700 °C – 1.000 °C und für Messing (ECOBASS, CW724R) im Temperaturbereich 500 °C – 800 °C durchgeführt. Es wurden die Dehnrates 0,1 1/s, 1 1/s und 10 1/s untersucht.

- Erzielte Ergebnisse

Mit Hilfe der gemessenen Fließkurven wurde das Umformverhalten der Presswerkstoffe durch die konstitutive Zener-Hollomon-Gleichung

$$\frac{d\varphi}{dt} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = Z = A(\sinh \alpha\sigma)^n \quad (\text{Gl. 1})$$

temperatur- und dehnratenabhängig beschrieben und in die FE-Software eingepflegt. Die ermittelten Materialkonstanten sind in Tabelle 2 aufgelistet. Aufgrund der Phasenumwandlung der Messinglegierung im Bereich von 600 °C – 650 °C wurden für die beiden Temperaturbereiche jeweils unterschiedliche Materialkonstanten bestimmt. Das angestrebte Ziel des APs wurde in vollem Umfang erzielt.

Tabelle 2: Materialkonstanten der Presswerkstoffe für den  $\sinh$  Ansatz.

Materialkonstanten					
Werkstoff	Aktivierungsenergie Q [J/mol]	Reziproker Dehnratenfaktor A [s <sup>-1</sup> ]	Spannungsmultiplikator $\alpha$ [Mpa <sup>-1</sup> ]	Dehnratenverfestigungsexponent n	Fehlerquadratsumme
CW724R 500-600 °C	377675	2,04E+22	0,0050	4,430	1025
CW724R 650-800 °C	192040	2,77E+11	0,0225	3,630	23
CW024A 700-1000 °C	231518	2,55E+10	0,0255	4,113	128

### AP 2.3 Verifizierung der wahren Deformation und Temperaturentwicklung der Werkzeuge (FZS)

- Durchgeführte Arbeiten

Für die Ermittlung der thermo-mechanischen Belastung der Matrize beim Strangpressen von Buntmetallen wurden Pressversuche durchgeführt. Je Werkzeug- und Presswerkstoff wurde eine Strangpressmatrize mit Aufnahme für ein Thermolement zur Erfassung der Strangtemperatur gefertigt (siehe Abbildung 14). Während den Pressungen wurde die Entwicklung der Presskräfte und Strangtemperatur aufgezeichnet, um später für die Verifikation der numerischen Modelle zur Verfügung zu stehen. Insgesamt wurden je Werkzeug drei Bolzen verpresst. Im Vorlauf zu der ersten und nach jeder einzelnen Pressung wurden die Werkzeuge mittels 3D-Streifenlichtscan vermessen, um die plastische Deformation zu ermitteln.

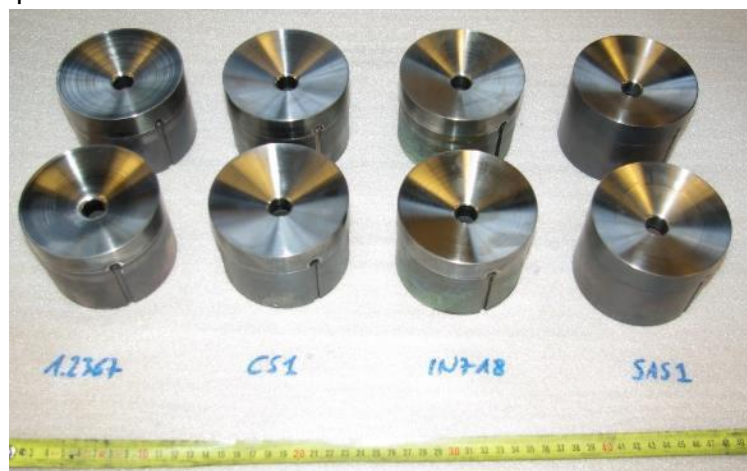


Abbildung 14: Strangpressmatrizen aus den vier untersuchten Werkzeugwerkstoffen Warmarbeitsstahl 1.2367, Sonder-Warmarbeitsstahl CS1, Nickelbasislegierung 2.4668 (Alloy 718) und 2.4775 (Stellite 1); je zweifache Ausführung.



- Erzielte Ergebnisse

Für die im Rahmen dieses Projekts gewählten Prozessparameter (Tabelle 3) ergeben sich maximale Matrizen- und Reibkräfte im Bereich von 3,25 MN und 1,3 MN für Kupfer CW024A und 2,25 MN und 1,3 MN für Messing CW724R (vgl. Abbildung 15, links). Die gemessenen Strangaustrittstemperaturen (Abbildung 15, rechts) weisen starke Schwankungen untereinander auf, was auf eine Verschiebung der Thermolemente während der Pressung zurückzuführen ist. Daher wurde vorwiegend die oberflächennahe Matritzentemperatur statt der Strangaustrittstemperatur gemessen. Die maximalen Temperaturen liegen im Bereich von 800 °C für Kupferpressungen bzw. 700 °C für Messingpressungen.

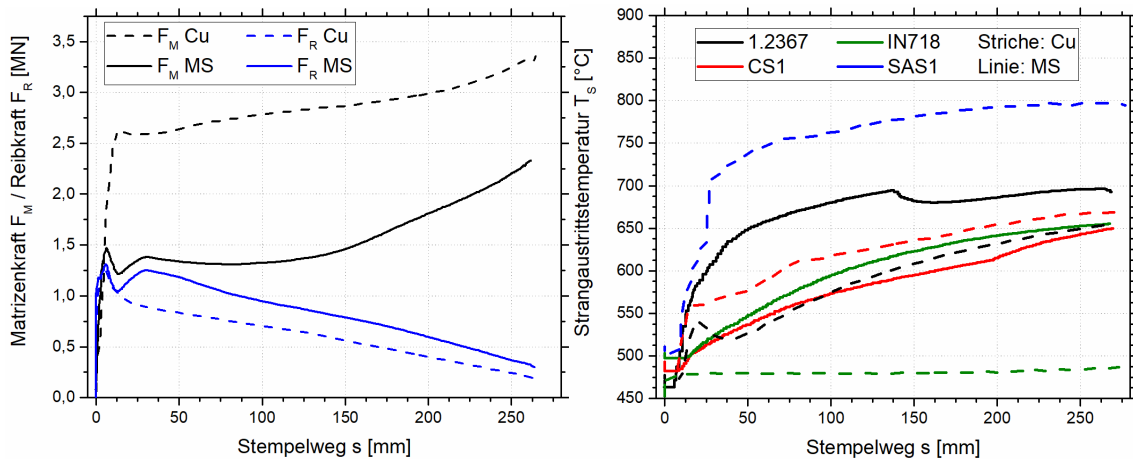


Abbildung 15: exemplarische Darstellung der gemittelten Matrizen- und Reibkräfte aus je vier Pressversuchen (links) und ausgewählte Strangaustrittstemperaturen für Kupfer CW024A und Messing CW724R.

Tabelle 3: Pressparameter der Strangpressversuche.

Aufnehmer- durchmesser	Strang- durchmesser	Pressverhältnis	Stempel- geschwindigkeit
95 mm	15 mm	41 : 1	20 mm/s
Bolzenmaße	Bolzentemperatur	Aufnehmer-/ Werkzeugtemperatur	
Ø92 x 300 mm	Cu 850 °C MS 750 °C	500 °C	

Mit Hilfe der erstellten 3D-Scans der Strangpresswerkzeuge lässt sich die zurückbleibende Deformation nach jedem weiteren Presszyklus darstellen. Abbildung 16 zeigt beispielhaft die geometrischen Veränderungen an den Werkzeugen aus Sonder-Warmarbeitsstahl CS1 und der Nickelbasislegierung Alloy 718, die dreimal mit Kupfer bepresst wurden. Als Referenz wurde jeweils der Ausgangszustand vor der ersten Pressung verwendet. Aufgrund der höheren Presskräfte und -temperaturen wird bei Kupferpressungen eine stärkere Werkzeugdeformation als bei Messingpressungen beobachtet. Der direkte Vergleich der vier untersuchten Werkzeugwerkstoffe zeigt die größten plastischen Deformationen im Presskanal bei dem Werkzeug aus Sonder-Warmarbeitsstahl CS1 (ca. -0,04 mm / +0,03 mm), gefolgt von dem Werkzeug aus Warmarbeitsstahl 1.2367 (ca. -0,01 / +0,02 mm). Die Matrizen aus den Nickel- und Kobaltbasislegierungen Alloy 718 und Stellite 1 weisen nur vernachlässigbare Änderungen (<0,01 mm) an der formgebenden Geometrie auf. Das angestrebte Ziel des APs wurde in vollem Umfang erzielt.

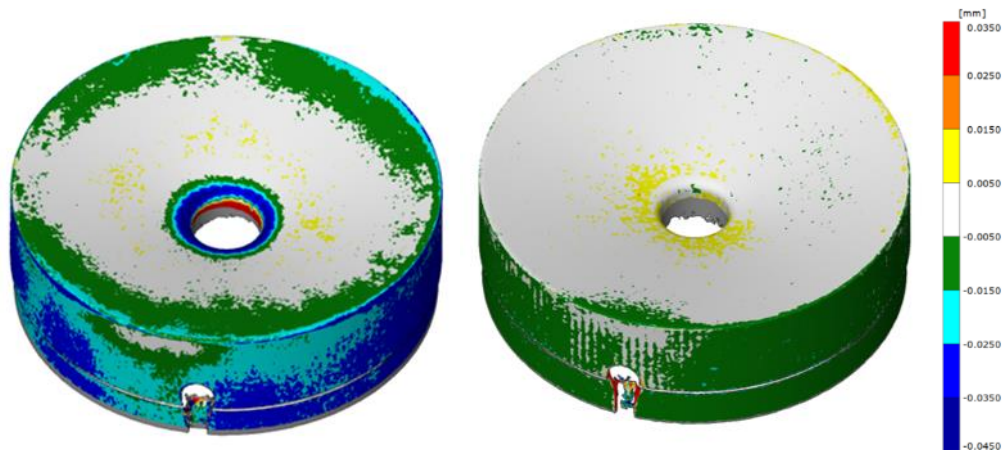


Abbildung 16: Geometrische Veränderungen an den Kupfer-Strangpresswerkzeugen aus Sonder-Warmarbeitsstahl CS1 (links) und Nickelbasislegierung Alloy 718 (rechts).

#### AP 2.4 Deformationsverhalten und Grenzdeformation der Oberflächenmodifikation unter Prozessbedingungen (FZS)

##### ▪ Durchgeführte Arbeiten

Zur Ermittlung des Deformationsverhaltens und Charakterisierung der Grenzdeformation der untersuchten Oberflächenmodifikationen wurden Stauchversuche an ausgewählten Substrat-Schicht-Kombinationen durchgeführt. Hierfür wurden weitere Druckproben aus den Werkzeugwerkstoffen hergestellt und die entsprechenden Oberflächenmodifikationen appliziert. Die Proben wurden bei verschiedenen Temperaturen (500 °C – 900 °C, 100 °C Intervalle) bis zu definierten Dehnungen axial gestaucht und die resultierende Radialdehnung mittels Extensiometer registriert und aufgezeichnet. Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen zur Werkzeugbelastung ergaben elastische Dehnungen im Bereich von 0,5-1% im Umfeld des Presskanals. Daher wurden in den Versuchen Dehnungen von 0,5%, 1% und 2% aufgebracht. Mittels lichtmikroskopischer Aufnahmen wurde anschließend die Schichtintegrität bewertet. Untersucht wurden die vier vielversprechendsten Substrat-Schichtkombinationen Ti-B-N auf 1.2367, Ti-Si-B-C-N auf 1.2367, Borierzone auf Alloy 718 und Borierzone auf Stellite 1.

##### ▪ Erzielte Ergebnisse

Die Ti-B-N-Beschichtung zeigt unabhängig von der Einsatztemperatur bereits bei kleinen Dehnungen des Substrats von 0,5% lokale Abplatzungen. Ab Dehnungen von 1% sind ausgedehnte Abplatzungen und Risse deutlich zu erkennen (Abbildung 17, mitte). Die Ti-Si-B-C-N-Beschichtung bleibt bei Dehnungen von 0,5% und Temperaturen bis 600°C intakt. Ab höheren Dehnungen und Temperaturen zeigen sich Risse und Abplatzungen (Abbildung 17, rechts). Um eine durch die thermische Ausdehnung der Probe induzierte Beschädigung des Schichtsystems auszuschließen, wurde ein Einzelversuch bei 900°C ohne axiale Stauchung durchgeführt. Da bei der Untersuchung dieser Probe keine Beschädigungen der Ti-Si-B-C-N-Schicht auftraten ist das Versagen der zuvor untersuchten Proben allein auf die mechanische Belastung zurückzuführen. Die mittels PACVD applizierten Beschichtungen befinden sich demnach bei den beobachteten Dehnungen am Limit ihres Deformationsvermögens. In weiterführenden Untersuchungen muss daher die Auswirkung der Rissbildung und somit Beschädigung der Beschichtungen auf das Pressverhalten ermittelt werden.

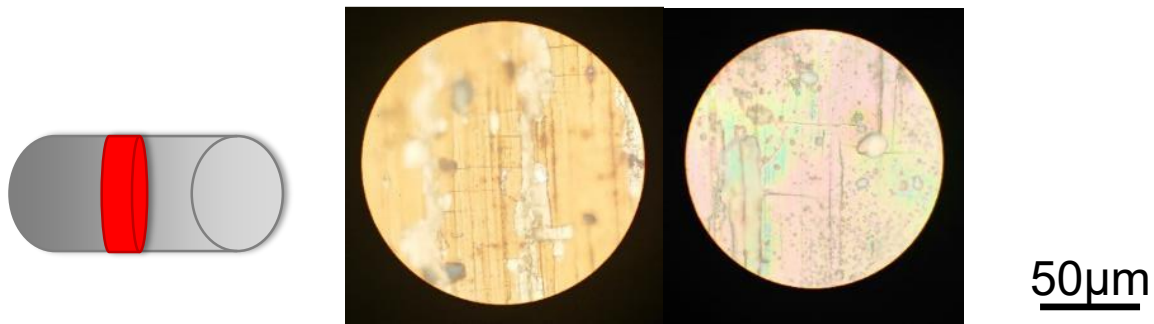


Abbildung 17: Darstellung der Probenorientierung und des inspizierten Bereichs (links), sowie Oberflächen der deformierten Zylinderproben: Ti-B-N, 1% Dehnung bei 500 °C (mitte) und Ti-Si-B-C-N, 1% Dehnung bei 900 °C (rechts).

Bei den Borierzonen auf Alloy 718 und Stellite 1 sind im Rahmen der untersuchten Parameterintervalle keine Beschädigungen zu erkennen. Aufgrund der Umwandlung des vorhandenen Substratmaterials sind die Borierzonen haffester und können trotz ihrer hohen Härte und damit einhergehender Sprödigkeit die Dehnungen des Substratmaterials ertragen. Ergänzende Versuche, bei denen die Proben Dehnungen von über 40% ausgesetzt waren, zeigten ein außerordentliches Deformationsvermögen der Borierzonen auf. In Abbildung 18 ist ein repräsentativer Querschliff der Probe aus Stellite 1 dargestellt. Trotz der hohen Dehnung treten keine Fehler der Interface- oder Schichtintegrität auf. Das angestrebte Ziel des APs wurde in vollem Umfang erzielt.

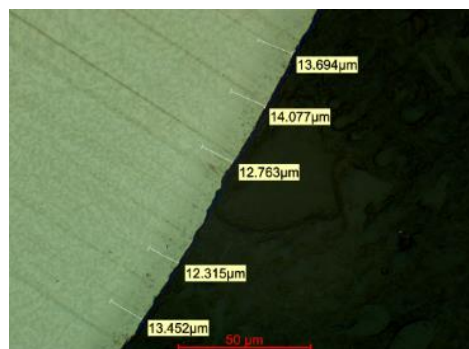


Abbildung 18: repräsentative Abbildung für die Integrität der Borierzone nach einer radialen Dehnung von mehr als 40%.

## AP 2.5 Ermittlung von Reibwerten mittels Hochgeschwindigkeits-Axial-Reibtester (FZS)

### ▪ Durchgeführte Arbeiten

Die Charakterisierung der Reibeigenschaften der untersuchten Oberflächenmodifikationen erfolgte Versuche am Hochgeschwindigkeits-Axial-Reibtester des FZS. Der Aufbau des Reibtesters ermöglicht die Variation der relevanten Prozessparameter Temperatur, Reibgeschwindigkeit und Normalspannung. Die Versuche wurden in einem Temperaturbereich von 650 °C – 750 °C (Messing) und 700 °C – 800 °C (Kupfer), sowie Reibgeschwindigkeiten von 0,1 mm/s – 33 mm/s umgesetzt. Die aufgebrachte Normalspannung wurde in Relation zur Fließspannung der Presswerkstoffe beschrieben

$$\sigma'_n = \sigma_n / k_f \quad (\text{Gl. 2})$$

und betrug für die Versuche mit Kupfer das 1-5-Fache der Fließspannung und für die Versuche mit Messing das 1-3-Fache der Fließspannung. Von dem zu Beginn der Untersuchungen geplanten anisothermen Versuchsaufbau wurde nach ersten Vorversuchen abgesehen, da eine zu rasche Probenabkühlung die Ergebnisse stark verfälschte. Stattdessen wurde der Aufbau des Reibtesters modifiziert, um einen isothermen Versuchsaufbau zu realisieren. Hierfür wurden Bauteile mit hoher Temperaturbeanspruchung aus der hochwarmfesten Nickelbasislegierung Alloy 718 gefertigt und eingesetzt. Untersucht wurden die unbehandelten Werkzeugwerkstoffe 1.2367 und Alloy 718, sowie die Substrat-Schicht-Kombinationen 1.2367 + Ti-B-N, 1.2367 + Ti-Si-B-C-N und Alloy 718 + Borierung, jeweils mit Kupfer und Messing als Reibpartner. Am Werkstoff 1.2367 wurde zudem eine Grundcharakterisierung der beiden Presswerkstoffe über das gesamte Versuchsfeld (Temperatur, Reibgeschwindigkeit und Normalspannung) durchgeführt. Weiterhin wurden Versuche zur Charakterisierung der Adhäsionsneigung zwischen den Oberflächenmodifikationen und den Presswerkstoffen durchgeführt. Hierfür wurde die Normalspannung zwischen Reibprobe und Gegenkörper vor Beginn des Versuchs wieder auf 0 gesenkt. Die im Versuch gemessene Reibung resultiert daher allein aus der Adhäsion der beiden Werkstoffe.

- Erzielte Ergebnisse

Die Versuche zur Grundcharakterisierung des Reibverhaltens der Presswerkstoffe unter Strangpressbedingungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Warmdruckversuche. Aufgrund des beim Strangpressen vorherrschenden, hohen Normaldrucks ist die sogenannte innere Reibung zu beobachten. Die Relativbewegung der beiden Reibpartner wird hierbei durch Scherung des weicheren Werkstoffes nahe der Oberfläche realisiert (Tresca-Reibung). Da die Scherfestigkeit direkt mit der Fließspannung des Werkstoffes korreliert, sind die Effekte der Versuchsparameter vergleichbar. Abbildung 19 zeigt beispielhaft das Reibverhalten der Kupferlegierung. Bei Variation der Versuchstemperatur (Abbildung 19, links) ist eine Abnahme der Reibkraft mit steigenden Temperaturen zu beobachten. Dies ist auf die Entfestigung des Werkstoffes bei zunehmender Temperatur zurückzuführen. In Bezug auf die Reibgeschwindigkeit ist trotz geringer Dehnratensensitivität der untersuchten Kupferlegierung eine deutliche Abhängigkeit der Reibkraft erkennen (Abbildung 19, mitte). Mit zunehmender Geschwindigkeit steigt die Reibkraft. Der Einfluss des Normaldrucks lässt sich durch eine Sättigungskurve beschreiben. Bis zu einem gewissen Schwellwert liegt eine Mischform aus Gleitreibung (Coulomb) und innerer Reibung (Tresca) vor und die Reibkraft steigt mit zunehmender Normalspannung (Abbildung 19, rechts). Bei weiterer Steigerung der Normalspannung ( $> 3$ ) ist keine signifikante Veränderung der Reibkraft zu beobachten. Die Relativbewegung der Reibpartner wird vollständig durch Scherung des Kupfers realisiert. Die Versuche mit der Messinglegierung zeigten, dass dieser Schwellwert dort erst bei einer normierten Normalspannung von 5 erreicht ist.

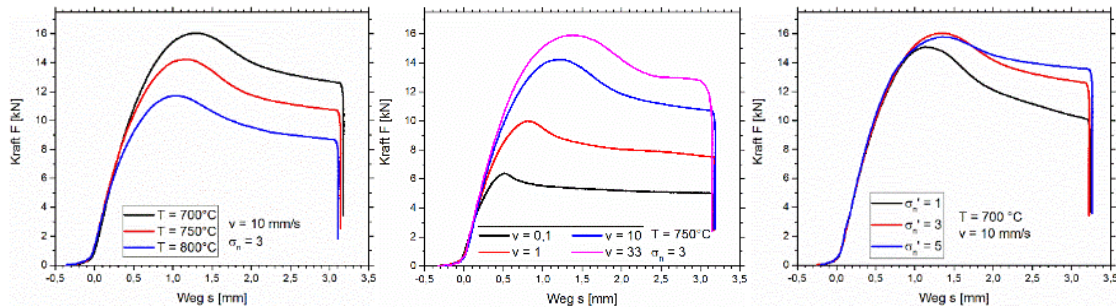


Abbildung 19: Grundcharakterisierung des Reibverhaltens von Kupfer. Reibkraft gegen Reiblänge mit Variation der Temperatur (links), der Reibgeschwindigkeit (mitte) und der Normalspannung (rechts).

Die Reibeigenschaften der verschiedenen Paarungen von Substrat-Schicht-Kombination und Presswerkstoff wurden in einem reduzierten Versuchsfeld bestimmt. Hierfür wurde die Reibgeschwindigkeit auf einen Wert von 10 mm/s festgelegt. In Abbildung 20 ist die Beeinflussung der Reibspannung durch die Oberflächenmodifikationen für die Kupferlegierung dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung wurden die Spannungswerte auf die Referenzwerte des unbehandelten Warmarbeitsstahls normiert. Deutlich zu erkennen ist die grundsätzliche Verringerung der Reibspannung durch die Oberflächenmodifikationen. Dies deutet darauf hin, dass im Falle der mittleren Normalspannungen ( $\approx 1$ ) der Anteil der weniger kraftintensiven Gleitreibung höher ist bzw. dass bei hohen Normalspannungen ( $>2$ ) der Schwellwert für die reine innere Reibung unterschritten ist und nun eine Mischform aus Gleit- und Scherreibung vorliegt. Zudem ist auch bei der unbehandelten Nickelbasislegierung Alloy 718 eine um ca. 15-25 % verringerte Reibspannung im Vergleich zum Warmarbeitsstahl zu beobachten. Für die Ti-B-N-Beschichtung reduziert sich die Reibung bei einer normierten Normalspannung von 1 unabhängig von der Temperatur um ca. 30 %. Für eine normierte Normalspannung von 3 beträgt die Reibungsreduktion ca. 70 %. Ein ebenfalls sehr großer Effekt ist bei der Ti-Si-B-C-N-Beschichtung zu sehen. Für alle untersuchten Parameterkombinationen ist die normierte Reibspannung im Vergleich zu den Versuchen mit Warmarbeitsstahl um 60-80 % reduziert. Die Borierung zeigt in Bezug auf die Reibung und im Vergleich zu den anderen Oberflächenmodifikationen den geringsten Effekt. Dennoch liegt die Reibspannung 10-20% unter dem Referenzwert. Auffällig ist die erhöhte Reibspannung im Vergleich zu dem unbehandelten Alloy 718. Eine mögliche Ursache hierfür ist die Aufrauung der Oberfläche durch die Borierung und somit ein erhöhter Kraftaufwand hinsichtlich einer höheren Reibkoeffizienten Gleitreibung.

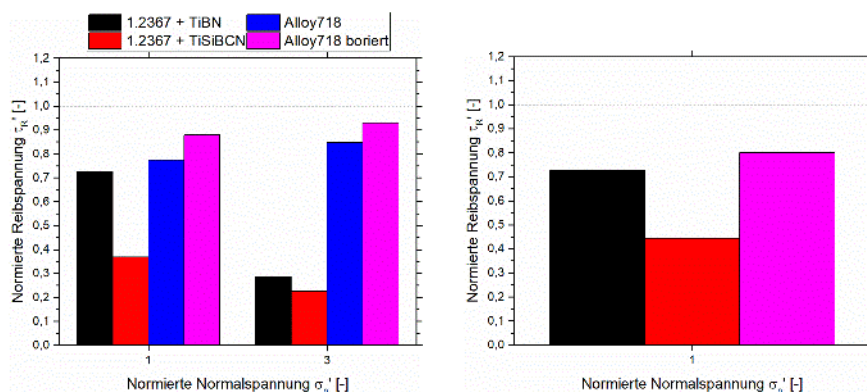


Abbildung 20: Reibspannung der Kupferlegierung in Abhängigkeit von Reibpartner und normierter Normalspannung bei 700 °C (links) und 800 °C (rechts); normiert auf Referenzversuche mit unbehandeltem Warmarbeitsstahl.

Die Untersuchungen mit der Messinglegierung zeigen einen starken Einfluss der Oberflächenmodifikationen bei einer normierten Normalspannung von 1 (Abbildung 21). So ist die normierte Reibspannung unabhängig von der Versuchstemperatur um 65-85 % geringer als bei den Referenzversuchen. Bei einer hohen, normierten Normalspannung von 5 ist nur ein geringer Effekt festzustellen. Lediglich die beiden PACVD-Beschichtungen erzeugen eine Reduzierung der normierten Reibspannung von bis zu 10 %.

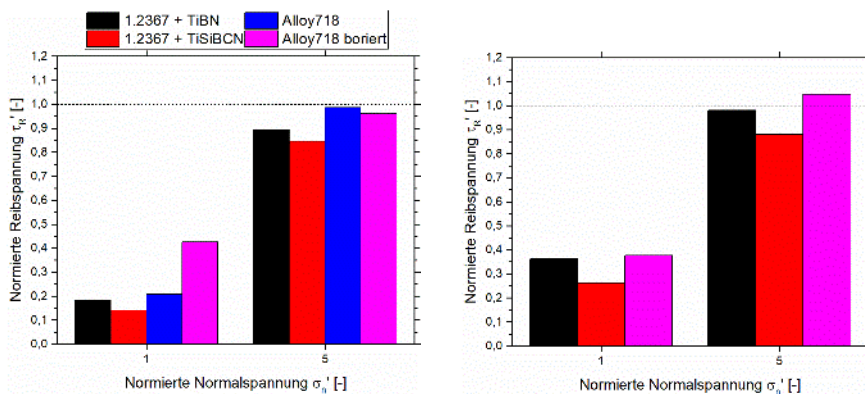


Abbildung 21: Reibspannung der Messinglegierung in Abhängigkeit von Reibpartner und normierter Normalspannung bei 650 °C (links) und 750 °C (rechts); normiert auf Referenzversuche mit unbehandeltem Warmarbeitsstahl.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Adhäsionsverhalten der verschiedenen Werkstoffpaarungen sind in Abbildung 22 und Abbildung 23 dargestellt. Für die Kupferlegierung (Abbildung 22) ist die Adhäsionsneigung zum Werkzeugwerkstoff bei der niedrigen Prüftemperatur (700 °C) und niedrigen normierten Normalspannung (1) durch die verschiedenen Oberflächenmodifikationen in geringem Maße verringert. Lediglich die Ti-Si-B-C-N Beschichtung weist einen signifikanten Effekt auf. Bei höherer Prüftemperatur (800 °C) und normierter Normalspannung (3) ist für die beiden PACVD-Beschichtungen ein deutlicher Einfluss zu erkennen. Die beim Losreißen der Probe ermittelte Spannung im Kupfer liegt ca. 70% unter dem Referenzwert. Die Adhäsionsneigung zwischen Kupfer und der boriierten Oberfläche des Alloy 718 erweist sich in dem untersuchten Parameterfeld als unabhängig von Temperatur und Normalspannung.

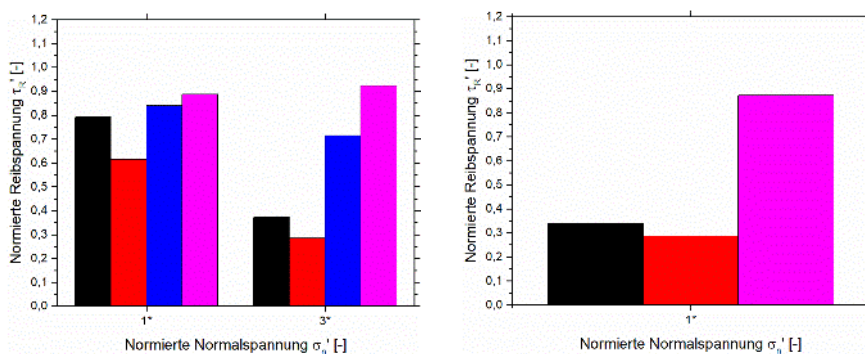


Abbildung 22: Losreißspannung der Kupferlegierung in Abhängigkeit von Reibpartner und normierter Normalspannung bei 700 °C (links) und 800 °C (rechts); normiert auf Referenzversuche mit unbehandeltem Warmarbeitsstahl.

Die Versuche an der Messinglegierung zeigen einen noch größeren Effekt bezüglich des Einflusses der Oberflächenmodifikationen auf die Adhäsionsneigung zwischen Press- und

Werkzeugwerkstoff (Abbildung 23). Für die Versuchstemperatur 650 °C (Abbildung 23, links) reduziert sich die Losreispannung bei den PACVD-Beschichtungen auf 10-15% des Referenzwertes. Für die Borierung wurde eine Verringerung auf 60-70% ermittelt. Auffällig ist die geringe Adhäsion der Messinglegierung zu dem unbehandelten Alloy 718. Für höhere Temperaturen (750 °C, Abbildung 23, rechts) steigt die ermittelte Losreispannung im Vergleich zu dem Referenzwert für alle Oberflächenmodifikationen an. Bei den PACVD-Beschichtungen beträgt die Zunahme ca 10-20% und im Fall der Borierung ist kein Unterschied mehr zur Referenzmessung zu verzeichnen. Im Fall der hohen normierten Normalspannung von 5 wurde für die Ti-B-N Beschichtung und Borierung sogar eine geringfugig erhöhte Losreispannung gemessen.

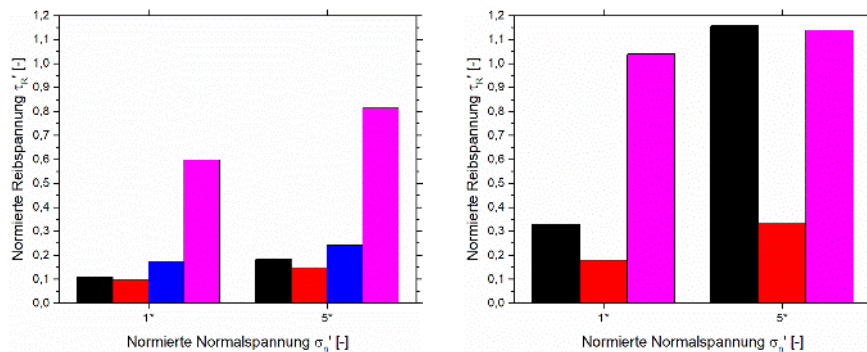


Abbildung 23: Losreispannung der Messinglegierung in Abhängigkeit von Reibpartner und normierter Normalspannung bei 650 °C (links) und 750 °C (rechts); normiert auf Referenzversuche mit unbehandeltem Warmarbeitsstahl.

Zusammenfassend ist für die Untersuchungen des Reib- und Adhsionsverhaltens festzuhalten, dass durch die Borierung ein signifikanter, aber deutlich geringerer Effekt im Vergleich zu den PACVD-Beschichtungen erzielt wurde. Für die beiden PACVD-Beschichtungen wurde eine starke Verringerung der Reibung und Adhäsion beobachtet. Vor Allem in der Kombination mit Messing konnte die Reibung bei geringen bis mittleren Normalspannungen reduziert werden. Da beim Strangpressen die Normalspannung im Presswerkstoff zum Matrizendurchbruch hin stark abfällt, kann dadurch das Pressverhalten verbessert werden und somit eine höhere Oberflächenqualität des Pressproduktes erzielt werden. Die gleichzeitig geminderte Adhäsion reduziert die am Werkzeug zurückbleibenden Anhaftungen und vereinfacht die zwischen den einzelnen Pressungen notwendige Reinigung der Werkzeuge.

Bei der mikrostrukturellen Untersuchung der Reibproben zeigte sich, dass die Deformation der Grenzschicht aufgrund des dynamischen Rekristallisationsverhaltens von Kupferbasierten Legierungen kaum nachvollziehbar ist.

Das angestrebte Ziel des APs wurde zum Teil erreicht. Die Modellierung des Reibverhaltens in Abhängigkeit von Temperatur, Reibgeschwindigkeit und Normalspannung konnte nicht erzielt werden. Die Notwendigkeit den Hochgeschwindigkeits-Axial-Reibtester für einen isothermen Versuchsaufbau zu konfigurieren, verzögerte die Versuchsdurchführung stark. Hinsichtlich sehr langer Lieferzeiten der benötigten hochwarmfesten Bauteile und Einschränkungen im Versuchsbetrieb aufgrund der Corona-Pandemie, konnte der umfangreiche Versuchsplan nicht umgesetzt werden. Stattdessen wurden die Versuche zur Ermittlung der Beeinflussung des Reibverhaltens durch Oberflächenmodifikationen um die Bestimmung des Adhsionsverhaltens erweitert.

## **AP 2.6 Numerische Berechnung der Werkzeugdeformation und der Wechselwirkung zwischen Umformgut und Beschichtung (FZS)**

### ▪ Durchgeführte Arbeiten

Die Analyse der Werkzeugdeformation erfolgte mittels numerischer Modellierung des Strangpressprozesses mit Hilfe des FE-Codes DEFORM 2D der Firma Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC). Durch Erstellen neuer Materialmodelle mit Hilfe der in AP 2.1 und 2.2 ermittelten Umformkennwerte, sowie weiteren mechanischen und thermischen Werkstoffparametern aus Literaturquellen erfolgte die Abbildung des Materialverhaltens sowohl der Werkzeug- und Presswerkstoffe. Das geometrische Modell wurde entsprechend der Pressversuche aus AP 2.3 erstellt. Dabei wurden alle relevanten Bauteile in dem numerischen Modell vernetzt, um den Wärmehaushalt der Buntmetallpressungen möglichst präzise darzustellen. Die in AP 2.3 ermittelten Presskräfte und Strangtemperaturen wurden genutzt, um die Modellierung zu verifizieren und durch Modifikation der Randbedingungen zu optimieren. Anschließend wurde eine entkoppelte Belastungsanalyse der Strangpresswerkzeuge durchgeführt. Zur Nachbildung der aufeinanderfolgenden Pressungen wurden die Werkzeuge in drei Zyklen thermomechanisch be- und entlastet. Aufgrund des elasto-plastischen Materialmodells, welches für die Werkzeugwerkstoffe erstellt wurde, konnte die elastische und plastische Werkzeugdeformation während und nach jedem Presszyklus abgeschätzt werden. Die Validation der Ergebnisse erfolgte durch den Vergleich mit den in AP 2.3 erstellten 3D-Scans.

### ▪ Erzielte Ergebnisse

Der Abgleich der numerischen Modelle und Strangpressversuche zeigte nach Anpassung der Randbedingungen eine sehr gute Übereinstimmung der Presskräfte (siehe Abbildung 24). Aufgrund der hohen Reproduzierbarkeit der Presskräfte in den Versuchen wurde jeweils ein Mittelwert aus vier Pressungen erstellt und mit den Ergebnissen der Modellierung verglichen. Die einzige signifikante Abweichung stellt die Überhöhung der Reibkraft zu Beginn der Pressung dar. Aufgrund der dehnungsunabhängigen Modellierung der Presswerkstoffe kann dieser Peak nicht dargestellt werden. In Bezug auf die Presstemperaturen sind deutliche Unterschiede zwischen gemessenem und modelliertem Wert zu erkennen. In der Simulation steigt die Strangaustrittstemperatur rasch auf ein Maximum an und fällt dann ab. Dies ist in Übereinstimmung mit der Erwartung, da der Bolzen aufgrund des anisothermen Prozesses beim Buntmetallpressen während der Pressung abkühlt und somit auch die Strangaustrittstemperatur sinkt. Der gemessene Temperaturverlauf gleicht mehr der modellierten Matrizentemperatur nahe der Oberfläche. Dies unterstützt die Theorie des während der Pressung in die Matrize zurückgeschobenen Thermoelements.



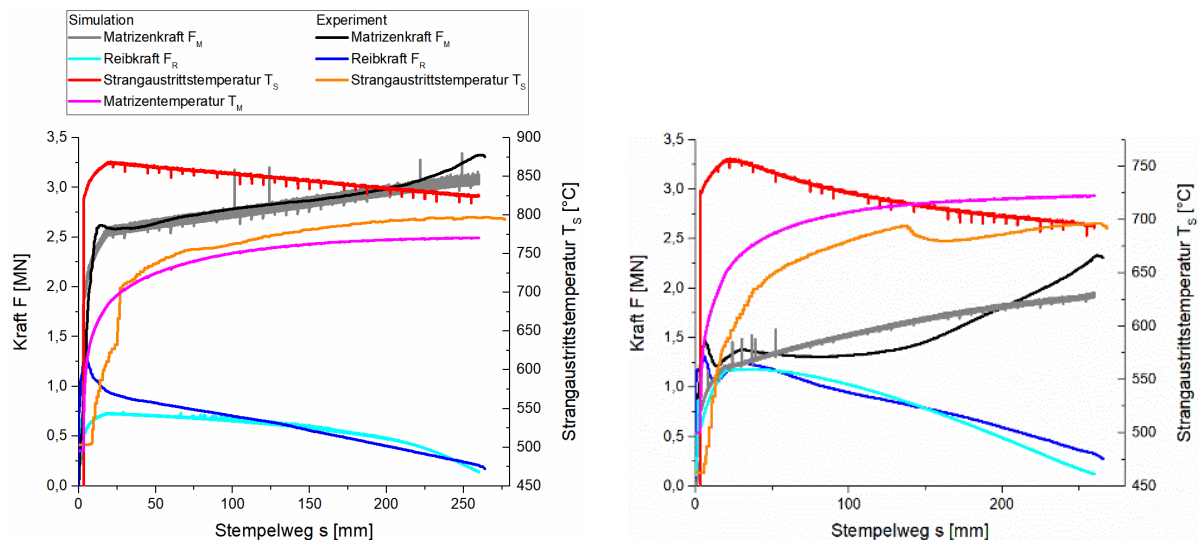


Abbildung 24: Gegenüberstellung der gemessenen und modellierten Pressdiagramme für Kupfer (links) und Messing (rechts).

Mit Hilfe der entkoppelten Belastungsanalyse wurde die elastische Deformation der Werkzeuge während des Pressvorganges und die Entwicklung der plastische Deformation über mehrere Presszyklen hinweg abgebildet. Abbildung 25 zeigt diese Entwicklung der Deformation anhand der im Werkzeug auftretenden Dehnung. Während die elastische Deformation aufgrund der wiederkehrend identischen mechanischen Last unverändert bleibt, akkumuliert sich die plastische Deformation vor allem am thermomechanisch hochbelasteten Einlaufradius in den Presskanal. Für das Werkzeug aus 1.2367 steigt diese plastische Deformation innerhalb der drei untersuchten Zyklen auf 0,008, für das Werkzeug aus CS1 auf 0,016. Aufgrund der guten Hochtemperatureigenschaften der Werkstoffe 2.4668 und 2.4775 sind bei diesen Werkstoffen nur sehr geringe Dehnungen von 0,003 und 0,001 zu beobachten.

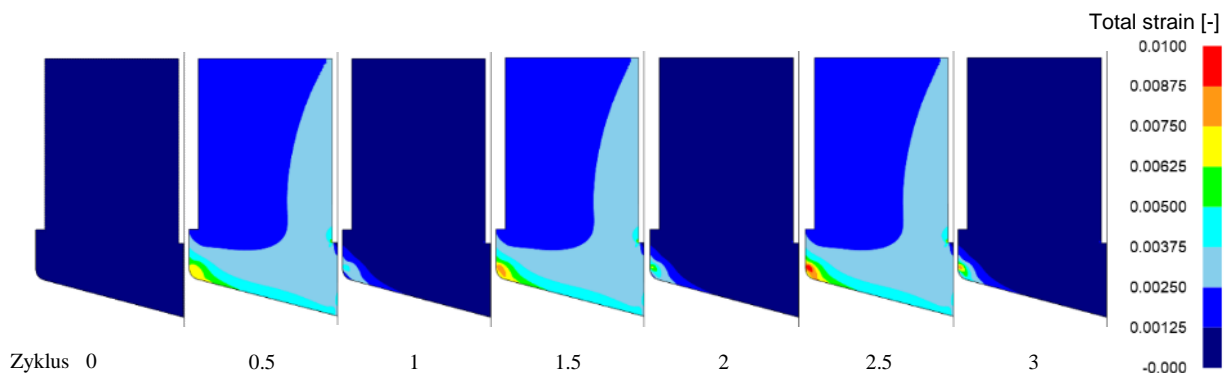


Abbildung 25: modellierte Entwicklung der elastischen und plastischen Deformation im Werkzeug über 3 Presszyklen hinweg am Beispiel des Werkzeugs aus 1.2367 mit Kupfer als Presswerkstoff; Ausgangszustand (Zyklus 0), belastete Zustände (Zyklen 0,5, 1,5 und 2,5) sowie

Die plastische Deformation führt zu einer ungewünschten Veränderung der formgebenden Werkzeuggeometrie. Diese Veränderung ist in Abbildung 26 durch die Darstellung der radialen Verschiebung der Matrizenfunktionsfläche exemplarisch durch die mit Kupfer bespressten Werkzeuge dargestellt. Abbildung 26, a) zeigt die mit 150 Punkten vermessene Konturlinie, beginnend am Ende des Presskanals und an der Matrizenichtfläche endend. Für die Matrize aus 1.2367 ist eine gesamtheitliche Verschiebung in radialer Richtung zu verzeichnen (Abbildung 26, b), die aus einer geringfügigen plastischen Deformation der Werkzeugoberfläche herrührt. Mit

zunehmender Zyklenzahl steigt die Verschiebung im Umfeld des Einlaufradiuses (Konturlänge ca. 11 mm). Aufgrund der hohen thermo-mechanischen Belastung, nämlich maximale Matrizentemperatur und hohe Spannungen im Matrizenkonus, wird zunehmend Material in richtung des Presskanals deformiert, was einer Verschiebung in negativer radialer Richtung entspricht. Eine ähnliche, aber stärker ausgeprägte Entwicklung ist bei dem Werkstoff CS1 zu beobachten (Abbildung 26, c). Ursache hierfür ist die bei Prozesstemperatur (ca. 750 °C) geringere Stauchgrenze im Vergleich zu dem Werkstoff 1.2367. Aufgrund der hohen Warmfestigkeit der Nickelbasislegierung Alloy 718 ist in Abbildung 26, d) nur eine geringe Verschiebung und keine Zunahme mit den Presszyklen zu beobachten. Selbes gilt für die Kobaltbasislegierung (Abbildung 26, e). Die Diskontinuität der Konturlinie ist auf den Übergang von Matrizeninsatz zu Werkzeughalter zurückzuführen, da aufgrund der Sprödigkeit der Kobaltbasislegierung mit einem Schrumpfverband als Abstützung gearbeitet wurde.

Die mit Hilfe der Modellierung ermittelten Deformationsdaten stimmen im Sinne der Tendenz und des Verlaufs mit den aus den 3D-Scans gewonnenen Werten überein. Allerdings unterschätzt die Simulation den Absolutwert der plastischen Deformation.

Das angestrebte Ziel des APs wurde zum Teil erreicht. Mangels der fehlenden Reibmodellierungen aus AP 2.5 und unzureichender Materialkennwerte der Oberflächenmodifikationen konnten diese nicht in den numerischen Untersuchungen dargestellt werden. In nachfolgenden Untersuchungen soll der E-Modul der Oberflächenmodifikationen bei Einsatztemperatur (ca. 700 – 800 °C) ermittelt werden, sodass die mechanischen Eigenschaften der Oberflächenmodifikationen und deren Einfluss auf den Substratwerkstoff modelliert werden können.

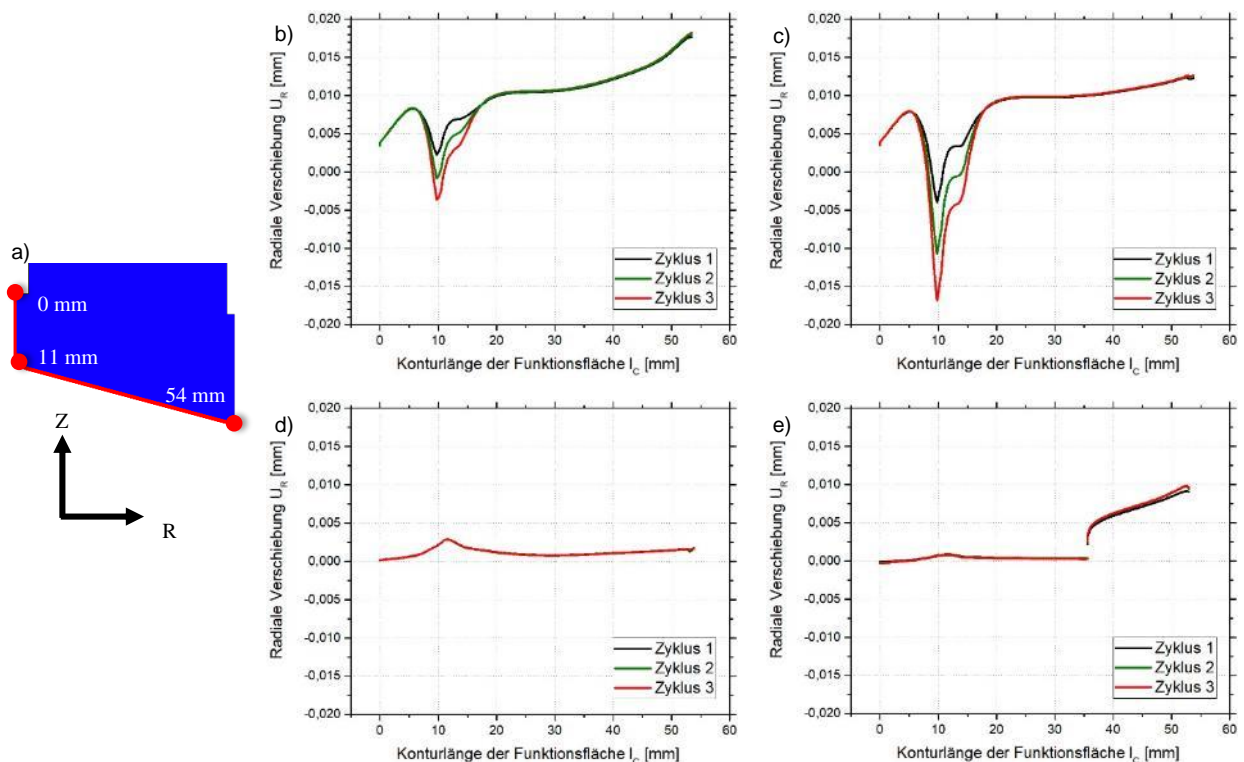


Abbildung 26: a) Konturlinie für die Messung der Verschiebung (a) und die Entwicklung der radialen Verschiebung über drei Prozesszyklen hinweg für die Werkzeuge aus 1.2367 (b), CS1 (c), 2.4668 (d) und 2.4775 (e); jeweils für die Modellierungen mit Kupfer.

### AP 3 Identifikation der Reib- und Verschleißvorgänge unter Berücksichtigung des spezifischen Belastungskollektivs beim Warmstrangpressen von Bunt- und Schwermetallen

#### AP 3.1 Randschichtmodifikation an 3D-Innenkonturen (IOT)

3D-Innenkonturen in Form von Matrizeneinsätzen wurden sowohl boriiert (Substrat Alloy 718) als auch mit Ti-B-N und Ti-Si-B-C-N beschichtet (Substrat 1.2367). Für die erfolgreiche Borierung der komplexen Geometrie wurden an den einfachen Referenzproben mit Fase (siehe Abbildung 27) Querschliffbilder angefertigt und die Gleichmäßigkeit der Borierung an der Fase untersucht. Es ist in Abbildung 23 eindeutig zu erkennen, dass die Borierung weder Lunker noch maßgebliche Abweichungen in der Dicke der Borierung oder der Kontur enthält. Auf der rechten Seite in Abbildung 27 ist ein borierter Matrizeneinsatz in der Draufsicht dargestellt. Um die 3D Geometrie zu verdeutlichen ist darunter die Seitenansicht eingezeichnet. Die lichtmikroskopische Untersuchung der Oberfläche zeigte, dass keine Defekte zu erkennen sind und die Borierung über die gesamte Funktionsfläche homogen erfolgte.

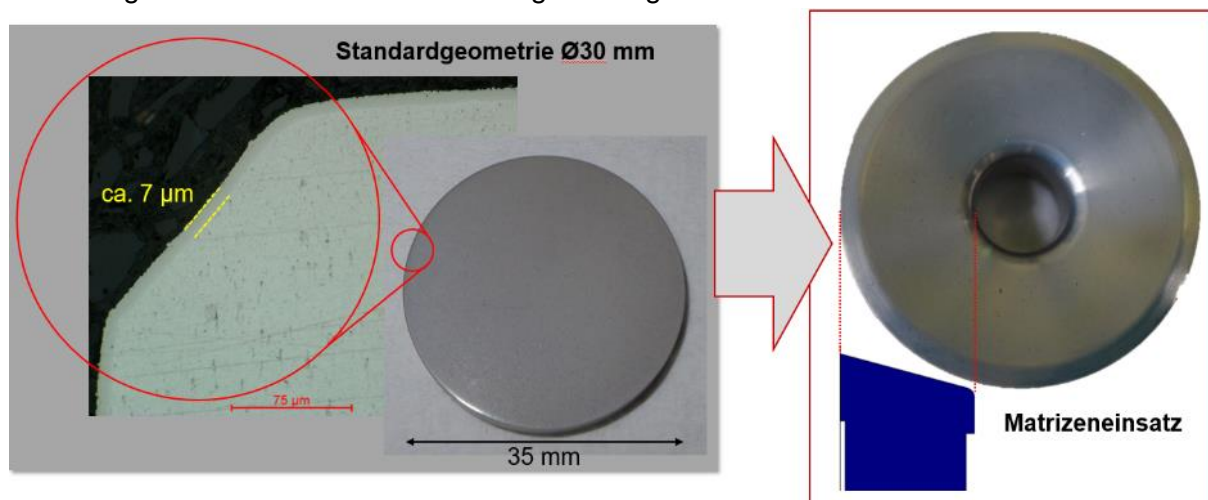


Abbildung 27: Borierungen des Alloy 718. Links: Borierte Standardprobe und Querschnittansicht der Fase. Rechts: borierter Matrizeneinsatz.

Die PACVD Beschichtungen wurden im Laufe des Projekts auf Kundenbauteilen in anderen Projekten appliziert. In Einklang mit den Erfahrungswerten wurden hier bei homogene Schichten abgeschieden, die den 3D Konturen sehr gut folgten. Entsprechend wurden die Matrizeneinsätze mit den etablierten Prozessen behandelt. Lichtmikroskopische Untersuchungen zeigten eine glatte und homogen ausgeprägte Oberfläche. Die späteren Versuche zeigten, dass die Schichten gut hafteten.

#### AP 3.2 Strangpressen mit randschichtmodifizierten Matrizeneinsätzen (FZS)

- Durchgeführte Arbeiten

Die Strangpressversuche mit oberflächenmodifizierten Werkzeugwerkstoffen erfolgten mit einer modularen 2-Loch-Matrize. Durch modularen Aufbau war es möglich eine Vielzahl verschiedener Kombinationen an behandelten und unbehandelten Referenzwerkzeugen jeweils paarweise zu bepressen. Die Prozessparameter sind in nachstehender Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Pressparameter der Strangpressversuche mit modularer Matrize.

Aufnehmer- durchmesser	Strangdurchmesser	Pressverhältnis	Stempel- geschwindigkeit
125 mm	14 mm	40 : 1 (zweisträngig)	15 mm/s
Bolzenmaße	Bolzentemperatur	Aufnehmer-/ Werkzeugtemperatur	
Ø122 x 300 mm	Cu 850 °C MS 750 °C	500 °C	

Je Presswerkstoff wurden folgende Kombinationen untersucht:

- 1.2367 vs. 1.2367 + Ti-B-N
- 1.2367 vs. 1.2367 + Ti-Si-B-C-N
- 1.2367 + Ti-B-N vs. 1.2367 + Ti-Si-B-C-N
- 1.2367 vs. 2.4668
- 1.2367 vs. 2.4668 + Borierung
- 2.4668 vs. 2.4668 + Borierung
- Stellite 12 vs Stellite 12 + BE34.3 (WEFA)
- 2.4668 vs. 2.4668 + Borierung (WEFA)
- 2.4668 vs. 2.4668 + BE42 (WEFA)

Für die mit (WEFA) gekennzeichneten Kombinationen wurden die Matrizeninserts durch die Fa. WEFA Inotec GmbH im Rahmen der vAW bereitgestellt. Bei den Versuchen wurde gezielt auf eine Schmierung der Matrizenstirnfläche verzichtet, um den Einfluss der Oberflächenmodifikationen hervorzuheben.

#### ▪ Erzielte Ergebnisse

Die Auswertung der Strangpressversuche zeigte eine sehr gute Wiederholbarkeit innerhalb eines Presswerkstoffs. Abbildung 28 zeigt repräsentative Pressdiagramme mit Darstellung der Presskräfte. Das angestrebte Ziel des APs wurde zum Großteil erzielt. Auf die 3-Fache Wiederholung von Pressversuchen wurde zugunsten der Vielfalt von untersuchten Substrat-Schicht-Kombinationen verzichtet.

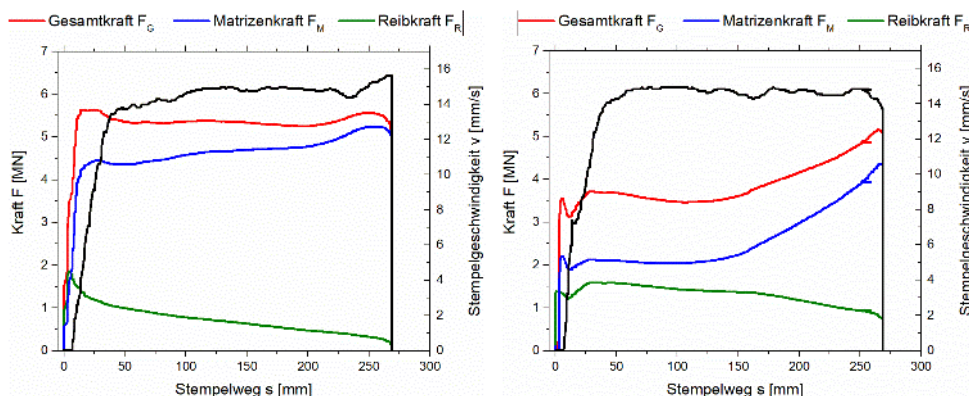


Abbildung 28: Repräsentative Pressdiagramme der Versuche mit modularer 2-Loch-Matrize für Kupfer (links) und Messing (rechts).

### AP 3.3 Analyse der Einsätze hinsichtlich Schichtzusammensetzung, Anhaftungen und Verschleiß (IOT)

- Durchgeführte Arbeiten

Im ersten Präparationsschritt wurden durch leichte mechanische Krafteinwirkung mit Hilfe einer Politurpaste, einer Kupferdrahtbürste und Schleifwolle die leicht anhaftenden Adhäsionspartikel entfernt. Die Politurpaste konnte erfolgreich die schwach haftenden Partikel entfernen. Die mechanische Bearbeitung mit der Kupferdrahtbürste hatte nur einen geringen Einfluss auf die Oberfläche, während die Schleifwolle die adhäsiven Partikel nach und nach abgetragen hat, diese jedoch nicht als Ganzes ausgebrochen hat. In Abbildung 29 sind die Matrizenoberflächen nach den zuvor genannten Schritten zu erkennen. Die grünen Punktstrichlinien zeigen zudem die Stellen, an denen die Proben später geschnitten wurden. Beide Matrizenensätze waren im gleichen Zweilochstrangpresswerkzeug im Einsatz. Auf den ersten Blick lässt sich bereits abschätzen, dass die Modifikation der Oberfläche mit einer Reduzierung des adhäsiven Verschleißes einhergeht, da sich die Bilder fundamental voneinander unterscheiden. So liegt in Abbildung 29 (links) ein zweidimensionales Verschleißbild vor, d.h. die Adhäsion ist großflächig auf der Oberfläche verteilt. Im Kontrast dazu zeigt sich in Abbildung 29 (rechts), dass nur ein sehr geringer Anteil der Oberfläche mit Adhäsionen benetzt ist und diese ein eindimensionales Verschleißbild abgeben, das heißt keine flächige Ausprägung aufweisen, sondern in Linien verlaufen.

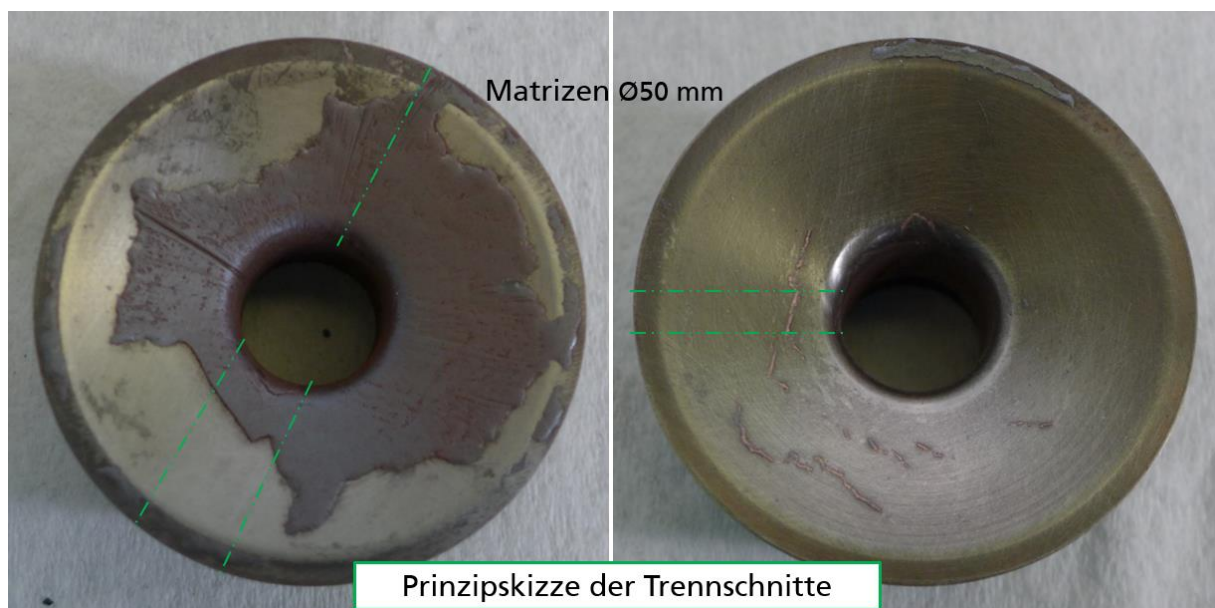


Abbildung 29: Oberflächen bepresster Strangpressmatrizen (links) aus 1.2367 ohne Oberflächenbehandlung und (rechts) aus Alloy 718 mit borierter Oberfläche

Die zugehörigen Schliffbilder sind in Abbildung 30 dargestellt. Dabei ist der Einlaufradius des Presskanals betrachtet worden, da dieser für die Bewertung des Verschleißverhaltens der Matrizen besonders wichtig ist. Bei der unbehandelten Probe aus 1.2367 ist in der linken oberen Ecke der Abbildung 30 (rechts) eine adhäsive Schicht zu erkennen. Diese ist ca. 60 µm dick und damit relativ stark ausgeprägt. Im Gegensatz dazu ist der Abbildung 30 (links) zu entnehmen, dass an der borierter Oberfläche in diesem Bereich keinerlei Anhaftungen vorzufinden sind.

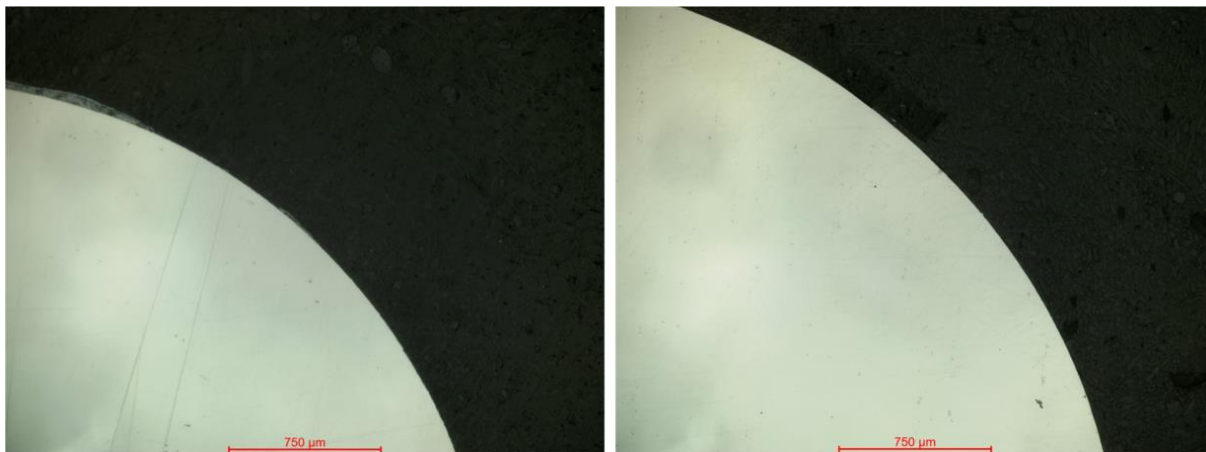


Abbildung 30: Querschliffbilder des Einschnürungsbereichs (links) der 1.2367 Probe ohne Oberflächenbehandlung und (rechts) aus Alloy 718 mit borierter Oberfläche

Auf Grundlage der Abbildung 29 (rechts) stellt sich die Frage, ob die linienförmigen Kupferanhaftungen auf der unbeschädigten borierten Oberfläche kleben, oder ob ein Riss vorliegt, der im Strangpressprozess mit Kupfer gefüllt wurde. Für die Verschleißbewertung ist diese Frage von entscheidender Bedeutung, da mechanische Werkzeugbeschädigung durch Abrasion beim Strangpressen von leicht umformbaren und weichen Legierungen wie Kupfer und Messing nicht auftreten darf. In der Querschliffansicht in Abbildung 31 ist ohne Zweifel zu erkennen, dass kein Riss vorliegt. Damit steht fest, dass sich der adhäsive Verschleiß beim Strangpressen mit boriertem Alloy 718 auf ein Minimum beschränkt.

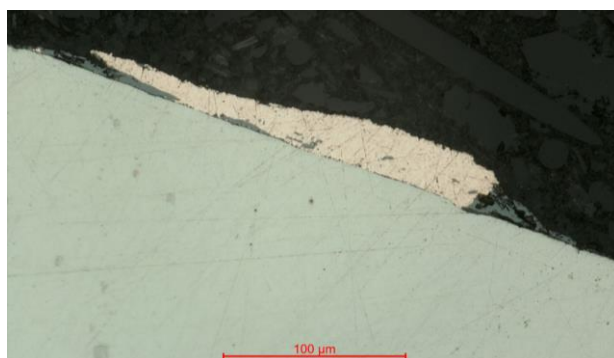


Abbildung 31: Querschliffansicht der linienförmigen Kupferadhäsion



Abbildung 32: Oberflächen bespresster Strangpressmatrizen; 1.2367 unbehandelt mit großflächigen Kupferanhaftungen (links), 1.2367 mit Ti-B-N-Beschichtung (mitte) und 1.2367 mit Ti-Si-B-C-N-Beschichtung (rechts) mit minimal ausgeprägten Anhaftungen

- Erzielte Ergebnisse

Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen unbehandelter und oberflächenmodifizierter Werkzeugoberfläche identifiziert worden. Der Ansatz der borhaltigen Modifikationen scheint dem Mechanismus des adhäsiven Verschleißes erfolgreich entgegenzuwirken. In einem Folgeprojekt soll der Ansatz weiterverfolgt werden und oberflächenbehandelte Strangpressmatrizen in einem Strangpresswerk im industriellen Feldversuch zum Einsatz kommen.

### AP 3.4 Analyse der Pressprodukte hinsichtlich Mikrostruktur, Oberflächenrauheit und Maßhaltigkeit (FZS)

- Durchgeführte Arbeiten

Im Anschluss an die Pressungen wurden die Lauflängenunterschiede der jeweils paarweise gepressten Stränge vermessen und ausgewertet. Die Stränge wurden weiterhin auf Maßhaltigkeit und Unterschiede in der Mikrostruktur untersucht.

Bezüglich der Matrizeinsätze erfolgte eine visuelle Bewertung der Rückstände von Presswerkstoff, sowie die Bestimmung der mit Anhaftungen besetzten Flächenanteile mittels digitaler Bildauswertung.

- Erzielte Ergebnisse

Die Untersuchung der Lauflängenunterschiede erwies hinsichtlich der Messinglegierung bei keiner Matrizenpaarung einen signifikanten Unterschied (Abbildung 32). Ebenfalls nur geringe Abweichungen in der Lauflänge gab es bei den Versuchen mit Kupfer und den PACVD-Beschichtungen bzw. der CrN-Beschichtung auf Alloy 718 (BE42, WEFA). Einzig die Borierungen und die bordotierte Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Beschichtung auf Stellite 12 (BE34.3, WEFA zeigten maßgeblich unterschiedliche Lauflängen. Dabei wirkten diese Oberflächenmodifikationen bremsend, was in einer um ca. 30% reduzierten Lauflänge des Stranges resultierte.

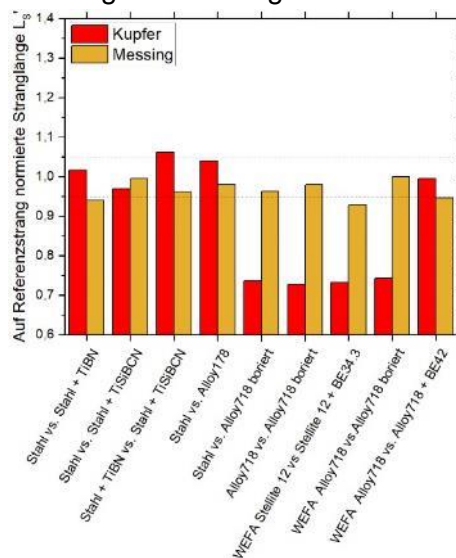


Abbildung 32: Längen der mit oberflächenmodifizierten Matrizeinsätzen gepressten Stränge, normiert auf den jeweils mit unbehandeltem Matrizeinsatz gepressten Referenzstrang (Referenz vs. Substrat + Oberflächenmodifikation).

Hinsichtlich der Maßhaltigkeit der gepressten Stränge konnten keine nennenswerten Unterschiede im Verlauf des Strangdurchmessers festgestellt werden. Bei allen Strängen ist eine Zunahme des Strangdurchmessers von Anfang bis Ende um etwa 0,1 mm zu verzeichnen. Dies

ist auf die Abkühlung des Bolzens während des Pressvorgangs zurückzuführen. Aufgrund der geringeren Bolzentemperatur am Ende der Pressung sinkt die Strangaustrittstemperatur und daher auch die bei der Abkühlung des Stranges zu beobachtende Schrumpfung.

Die metallographische Analyse der Korngrößen zeigte für Kupfer im Mittel höhere Werte für die Strangmitte im Vergleich zum Randbereich (Abbildung 33, links). Die verringerte Korngröße am Rand ist hierbei auf eine erhöhte, oberflächennahe Scherung des Presswerkstoffs durch den Kontakt mit dem Presswerkzeug zurückzuführen. Der Energieeintrag durch die zusätzliche Scherung fördert die Bildung von Keimstellen für Rekristallisation und somit die Ausbildung eines feineren Gefüges bei Rekristallisation. Eine systematische Beeinflussung der Korngröße durch die Oberflächenmodifikation der Presswerkzeuge ist nicht zu erkennen. Für die Versuche mit Messing betrug die mittlere Korngröße stets 6-8  $\mu\text{m}$  (Abbildung 33, rechts).

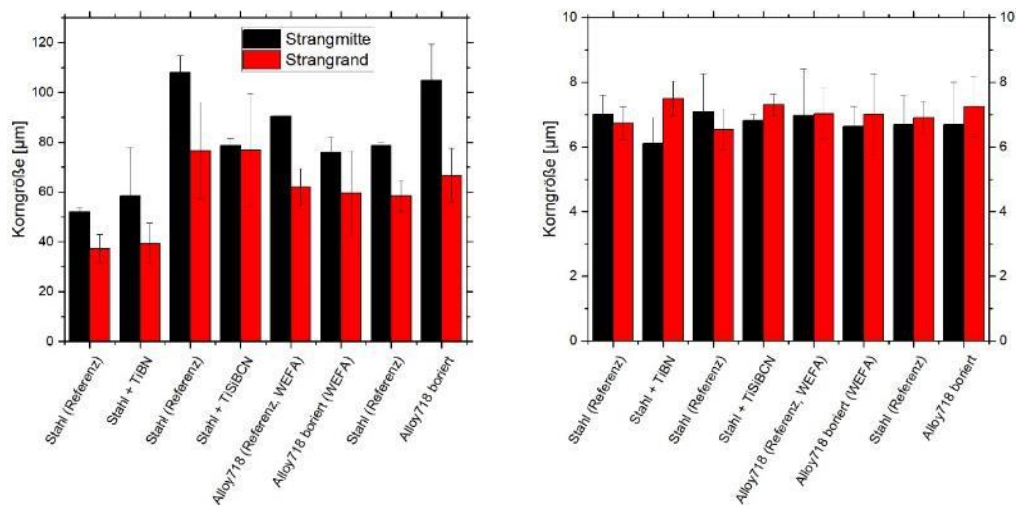


Abbildung 33: Korngrößen ausgewählter Rundstangen in Abhängigkeit von Matrizeneinsatz und Position im Strangquer-schnitt für Kupfer (links) und Messing (rechts).

Für die mit Kupfer bespressten Einsätze erfolgte eine digitale Bildauswertung hinsichtlich des mit Rückständen behafteten Flächenanteils auf der Funktionsfläche. Abbildung 34 zeigt beispielhaft zwei gleichzeitig bespresste Einsätze. Während sich auf dem unbehandelten Einsatz ein nahezu vollständiger, zum Teil bis zu 1 mm dicker, stark haftender Belag aus Kupfer und Zunder ausgebildet hat, sind auf dem mit Ti-Si-B-C-N beschichteten Einsatz nur wenige, leicht haftende Rückstände von Pressgut vorzufinden.



Abbildung 34: Aufnahmen der mit Kupfer bespressten Einsätze: Referenzeinsatz aus unbehandeltem 1.2367 (links) und mit Ti-Si-B-C-N beschichteter Einsatz aus 1.2367 (rechts), jeweils mit Detail des Presskanals.

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Bildauswertung aufgelistet. Deutlich zu erkennen ist die mit den Beschichtungen einhergehende Verringerung am Werkzeug haftenden Rückstände. Für die unbehandelten Werkzeuge liegt der Flächenanteil der Anhaftungen bei ca. 80-90%. Für die PACVD-Beschichtungen und die Borierung des 2.4668 reduziert sich dieser Anteil maßgeblich



auf ca. 5%. Die vorhandenen Rückstände befinden sich vor Allem im Bereich um den Presskanal mit reduzierter Normalspannung während des Pressvorgangs. Dies bestätigt zum Teil die Beobachtungen aus den Reibversuchen, bei denen eine höhere Adhäsionsneigung bei geringeren Normalspannungen verzeichnet wurde. Die beiden borhaltigen Oberflächenmodifikationen, welche von der Fa. WEFA bereitgestellt wurden reduzierten den Anteil auf 39% (Borierung) bzw. 33% ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , bordotiert). Für die Beschichtung mit CrN ist kein nennenswerter Effekt erkennbar.

Tabelle 5: Flächenanteil der an den Matrizenfunktionsflächen haftenden Rückstände aus Kupfer und Zunder.

	1.2367	1.2367 + Ti-B-N	1.2367 + Ti-Si-B-C-N	2.4668	2.4668 + Borierung	2.4668 + CrN	Stellite 12	Stellite + $\text{Al}_2\text{O}_3$ (bordotiert)
	0,93	0,05	0,08	0,78	0,05	0,82	0,88 (WEFA)	0,33 (WEFA)
Flächenanteil der Anhaftungen	0,82	0,04	0,04	0,36	0,06			
	0,95			0,75 (WEFA)	0,39 (WEFA)			
	0,68			0,82 (WEFA)				

Bei den Strangpressversuchen mit Messing zeigten die PACVD-Beschichtungen, sowie die CrN-Beschichtung auf 2.4668 und der bordotierten  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Beschichtung auf 2.4668 der Fa. WEFA den größten Effekt. Grundsätzlich treten im Vergleich zu den Versuchen mit Kupfer, keine massiven, flächendeckenden Anhaftungen auf. Stattdessen bildet sich ein dünner Film aus Pressgut aus, der vor Allem am Ende des Einlaufradius und im Presskanal aufdickt. Dieser Effekt wurde durch die oben genannten Beschichtungen weitestgehend unterbunden (vgl. Abbildung 35). Die Borierung des 2.4668 zeigt in diesem Bezug kein vorteilhaftes Pressverhalten.



Abbildung 35: Aufnahmen der mit Messing gepressten Einsätze: Referenzeinsatz aus unbehandeltem Stellite 12 (links) und mit bordotiertem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  beschichtetem Einsatz aus Stellite 12 (rechts), jeweils mit Detail des Presskanals.

Als Fazit der Strangpressversuche mit oberflächenmodifizierten Strangpressmatrizen lässt sich die ausgezeichnete Adhäsionsminderung aller Oberflächenmodifikationen in Kombination mit Kupfer DHP und die sehr gute Adhäsionsminderung durch die untersuchten PACVD-Schichten in Kombination mit Messing ECOBRASS hervorheben. Das angestrebte Ziel des APs wurde in vollem Umfang erzielt.

## 2. Verwendung der Zuwendung

### Forschungseinrichtung 1: Technische Universität Berlin, Forschungszentrum Strangpressen

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans) 159.288,36 €
  
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
  - Pressmatrize Ø125mm
  - modularer Matrizensatz12.841,29 €
  
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
  - Deform 3D Mietlizenz für Forschung und Lehre
  - Formatgerechte Bearbeitung von PM-Teilen
  - Strangguss und Bearbeitung von Strangpressbolzen aus Kupfer und Messing21.973,33 €

### Forschungseinrichtung 2: Technische Universität Braunschweig, Institut für Oberflächentechnik

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans) 150.450,00 €
  
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)  
Entfällt.
  
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)  
Entfällt.

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Zur Bearbeitung des Projektes wurden insgesamt 60 Monate wissenschaftlich-technisches Personal (A1) eingesetzt, wobei die Zuwendung wie folgt verwendet wurde:

- Forschungseinrichtung 1, FZS TU Berlin 30 Monate
- Forschungseinrichtung 2, IOT TU Braunschweig 30 Monate

Die Arbeiten wurden gemäß dem Forschungsantrag durchgeführt. Die für das Projekt geleisteten Arbeiten waren angemessen und zur Erreichung des Forschungszieles notwendig.

Aufgrund der breiten Anwendung als verschleiß- und wärmebeständiger Werkstoff war im Rahmen dieses Forschungsvorhabens der Einsatz der Kobalt-Basislegierung 2.4979 (Stellite 21) als Matrizenwerkstoff geplant. Die gezielte Durchführung einzelner Warmdruckversuche mit den beiden Kobalt-Basislegierungen 2.4979 und 2.4775 zeigte eine bessere Eignung der Legierung 2.4775 aufgrund einer höheren Festigkeit im Temperaturbereich von 500-1000 °C. Das für diese

Untersuchung notwendige Probematerial wurde vom Werkstofflieferanten kostenfrei zur Verfügung gestellt.

Die realitätsnahe Modellierung des elastischen und plastischen Verhaltens der Werkzeugwerkstoffe im Strangpressprozess bedingt genaue Kenntnisse über das Deformationsverhalten der Werkstoffe. Durch Ermittlung der temperaturabhängigen, mechanischen Kennwerte aus den aufgenommenen Fließkurven im prozessnahen Temperaturbereich von 500 - 1000 °C kann die zu erwartende Matrizendeformation und so die mechanische Beeinflussung der aufgetragenen Oberflächenmodifikationen abgeschätzt werden. Die aus den Versuchen für die Auswahl der Kobalt-Basislegierung gewonnenen Fließkurven konnten dabei berücksichtigt werden und so Anzahl an notwendigen Proben und Einzelversuchen reduziert werden.

Ebenso dienen die materialspezifischen Umformparameter der Presswerkstoffe zur Darstellung des Umformprozesses. Auf Anregung des im PA vertretenen Presswerks Wieland Werke AG wurden die Legierungen Kupfer DHP und Messing ECOBRASS untersucht. Mit diesen Parametern und der Software Deform 2D wurden numerische Modelle aufgebaut und berechnet. Mit Hilfe der aus den Berechnungen erhaltenen Prozessgrößen wurden Folgesimulationen durchgeführt, die zur Abschätzung der während des Strangpressprozesses auftretenden Werkzeugdeformation dienen. Aus den Berechnungen konnten sowohl die elastische Deformation der Werkzeuge im belasteten Zustand, als auch die plastische Deformation nach dem Pressvorgang ausgegeben werden.

Anhand der durchgeführten Pressversuche an Matrizen aus verschiedenen Werkzeugwerkstoffen wurden die numerischen Modelle verifiziert und optimiert, sodass sie den Prozess des Buntmetall-Strangpressens möglichst getreu abbilden.

Die elastische Deformation war Grundlage für die zu ermittelnde Grenzdeformation der Oberflächenmodifikationen (AP 2.4). Die zum Teil spröden Oberflächenmodifikationen ertragen nur ein bestimmtes Grenzmaß an Deformation, bevor Versagen durch Rissbildung oder Abplatzungen auftritt. Die plastische Deformation ist neben den Prozessparametern (z.B. Presskräfte und Strangaustrittstemperatur) ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Simulationsqualität. Hierfür wurden die Presswerkzeuge vor und nach dem Pressvorgang mittels 3D-Scans vermessen. Durch Abgleich der gemessenen und berechneten Werte konnten Abweichungen der Simulation von den Realversuchen ermittelt und durch Anpassung der Randbedingungen optimiert werden.

Im Gegensatz zum Leichtmetallstrangpressen, welches zumeist isotherm durchgeführt wird, besteht beim Buntmetallstrangpressen eine Temperaturdifferenz zwischen Pressgut und Presswerkzeugen. Dieser Tatsache sollte bei der Durchführung der Reibversuche auf dem Hochgeschwindigkeits-Axial-Reibtester berücksichtigt werden. Aufgrund des vergleichsweise geringen Volumens kühlt eine Reibprobe in Umgebung eines deutlich kühleren Aufnehmers jedoch sehr schnell aus. Als Maßnahme wurden Bauteile mit kritischer thermischer Beanspruchung aus dem hochwarmfesten Werkstoff Alloy 718 gefertigt, wodurch nun die Umsetzung eines isothermen Setups bei Temperaturen von bis zu 800°C möglich war. Aufgrund der stark verzögerten Lieferung dieser Bauteile konnte der umfangreiche Versuchsplan nicht umgesetzt werden. Stattdessen wurden die Versuche zur Ermittlung der Beeinflussung des Reibverhaltens durch Oberflächenmodifikationen um die Bestimmung des Adhäsionsverhaltens erweitert.

Bei den Strangpressversuchen mit randschichtmodifizierten Einsätzen wurden die Oberflächenmodifikationen im Anwendungsfall getestet und deren Eignung für das Strangpressen von Bunt- und Schwermetallen untersucht. Mit Hilfe der daraus hervorgehenden

bepressten Matrizen und erzeugten Pressprodukte erfolgte die Charakterisierung der Oberflächenmodifikationen hinsichtlich des Einflusses auf den Strangpressprozess.

Die durchgeführten Arbeiten entsprechen zum Großteil dem Zeit- und Arbeitsaufwand, wie sie indem bewilligten Forschungsantrag dargestellt sind.

Bedingt durch Ofenrevisionen beim Lieferanten der Cobalt-Basislegierung 2.4775 (Stellite 1) wurde die Fertigung der Presswerkzeuge und Proben für die Beschichtungsversuche stark verzögert. Dadurch konnten die in AP 2.3 geplanten Pressversuche und in AP 2.4 geplanten Versuche zur Ermittlung der Grenzdeformation nicht mehr im Haushaltsjahr 2019 durchgeführt werden. Stattdessen wurden die Durchführung und Auswertung der numerischen Berechnungen (AP 2.6) intensiv vorangetrieben. Die dabei verwendeten visco-plastischen Modelle für die Darstellung der deformierbaren Werkzeuge erforderte aufgrund ihrer Komplexität einen höheren Zeitaufwand als erwartet. Aufgrund der langen Lieferzeiten der Werkstoffe und den hohen Anforderungen bei der Verarbeitung der Werkstoffe zu 3D-Innenkonturen mit der notwendigen Oberflächenqualität kam es zu Verzögerungen in der Herstellung. Bedingt durch die COVID-19-Pandemie sind teilweise unumgängliche Verzögerungen aufgetreten. So konnten die Strangpressversuche und die 3D-Scans der Pressmatrizen aufgrund des zum Teil stark eingeschränkten Forschungsbetriebs an der TU Berlin nicht in dem geplanten Zeitrahmen ausgeführt werden. Die Lieferung der Bauteile aus Alloy 718 für die Umsetzung der isothermen Hochtemperatur-Reibversuche wurde stark verzögert, sodass die Versuche erst im Januar 2021 beginnen konnten. Da die Geometrie der Probekörper für die Reibversuche exakt auf die Maße des Reibprüfstandes angepasst sein muss, konnte die Fertigung der Probekörper erst im Dezember 2020 beginnen.

#### **4. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse (innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten)**

Die im Rahmen dieses Projektes umgesetzten Versuche weisen eine grundsätzliche Eignung der borhaltigen Oberflächenmodifikationen für die Applikation auf Werkzeugen für das Strangpressen von Bunt- und Schwermetallen nach. Sie liefern damit einen relevanten Beitrag zur Entwicklung von Oberflächenbehandlungen auf Strangpresswerkzeugen im Bereich Warmstrangpressen. Bisher fehlte hierfür eine geeignete Substrat-Schicht-Kombination, die den elastischen und plastischen Deformationen des Presswerkzeugs, standhält. Sowohl die Kombination PACVD-Beschichtung mit dem weit verbreiteten Warmarbeitsstahl 1.2367, als auch die Borierung der hochwarmfesten Nickelbasislegierung Alloy 718 zeichnen sich durch spezifische Charakteristika aus. Der PACVD-beschichtete Warmarbeitsstahl ist dabei für das Verpressen von Messing zu präferieren. Aufgrund der geringeren thermo-mechanischen Belastung können kritische Werkzeugdeformationen eher unterbunden und somit eine Beschädigung der Beschichtung vermieden werden. Zudem ist für diese Paarung aus Presswerkstoff und Oberflächenmodifikation eine besonders geringe Adhäsionsneigung zu beobachten. Mit der hochwarmfesten Nickelbasislegierung als Substratwerkstoff zeichnet sich die Borierung auf Alloy 718 für die Anwendung beim Pressen von Kupfer aus. Trotz der höheren Bolzeneinsatztemperaturen und Presskräfte bietet dieser Werkzeugwerkstoff eine ausgezeichnete Festigkeit, um der Werkzeugdeformation entgegenzuwirken. Diese Paarung unterbindet ebenfalls die Ausbildung der sonst üblichen Anhaftungen und Rückstände des Pressguts auf dem Werkzeug.

Infolgedessen wird die Reinigung der Presswerkzeuge zwischen den einzelnen Presszyklen vereinfacht und die Standzeit der Werkzeuge hinsichtlich des verringerten adhäsiven Verschleißes erhöht. Dies ist als enormer wirtschaftlicher Vorteil für die Presswerke zu beurteilen, da davon auszugehen ist, dass sich auf lange Sicht der finanzielle Aufwand für die aktuell schnell verschleißenden Werkzeuge reduziert. Der tatsächliche wirtschaftliche Nutzen der borhaltigen Oberflächenmodifikationen beim Strangpressen von Buntmetallen soll in einem Nachfolgeprojekt mit Versuchen auf industriellen Fertigungslinien evaluiert werden. Weiterhin wird durch eine erhöhte Werkzeugstandzeit die Ressourceneffizienz des Strangpressprozesses und somit auch der beteiligten Unternehmen gesteigert. Die Anwendung der Oberflächenmodifikationen steigert zudem das Potenzial der Werkzeugwerkstoffe und eröffnet den Werkzeugherstellern und Beschichtungsunternehmen die Möglichkeit eine neue Branche zu erschließen bzw. ihr Portfolio um ein neues Produkt zu erweitern.

Die in den numerischen Modellierungen gewonnenen Erkenntnisse aus den Simulationen des anisothermen Buntmetallpressens und der Werkzeugdeformation, sowie die hierfür notwendigen Kenndaten und -Werte wurden den Industriepartnern zur Verfügung gestellt und in Publikationen veröffentlicht. Hierdurch erlangen die Unternehmen Informationen aus Untersuchungen, deren eigene Durchführung bzw. Beauftragung aus Kosten- und Kapazitätsgründen nicht möglich wäre, und somit einen wettbewerblichen Vorteil gegenüber der internationalen Konkurrenz.

Durch die Bereitstellung von Referenzproben konnten die im PA vertretenen KMUs eigene Oberflächenmodifikationen in die Untersuchungen einbringen und an den Forschungsstellen im direkten Vergleich mit den verschiedenen Oberflächenmodifikationen charakterisieren lassen. Unter anderem wurde von den Firmen BorTec GmbH und WEFA Inotec GmbH die Borierung von Alloy718 auf den eigenen industriellen Beschichtungsanlagen durchgeführt und sowohl Referenzproben für Temper-, Haft- und Härteversuche, als auch Referenzwerkzeuge für Pressversuche zur Verfügung gestellt. Weiterhin wurden drei verschiedene Substrat-Schicht-Kombinationen der Fa. WEFA Inotec GmbH in die Pressversuche aufgenommen und hinsichtlich des Pressverhaltens mit den Oberflächenmodifikationen des IOT der TU Braunschweig verglichen.

## 5. Umsetzbarkeit und Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft

- Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Laufzeit
Ergebnispräsentation und Beratung	Fortschrittsbericht, Diskussion, Festlegung der Arbeitsschritte	1. Sitzung des PA in Dortmund	26.09.2018
Beratung	Erfahrungsaustausch, Diskussion, Beratung	Projekttreffen bei der WEFA Inotec GmbH in Singen	07.11.2018
Ergebnispräsentation und Beratung	Erfahrungsaustausch, Diskussion, Beratung	Projekttreffen bei der BorTec GmbH & Co. KG in Hürth	23.01.2019
Ergebnispräsentation und Diskussion	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch	AK Schwermetall des FA Strangpressen der DGM in Osnabrück	11.04.2019

Ergebnispräsentation und Beratung	Fortschrittsbericht, Diskussion, Festlegung der Arbeitsschritte	2. Sitzung des PA in Berlin	08.05.2019
Ergebnispräsentation und Diskussion	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch	Jahrestagung des Fördervereins des Forschungszentrum Strangpressen e.V. in Berlin	09.05.2019
Vortrag	Schulung von Mitarbeitern aus Strangpressbetrieben und Zulieferindustrie	DGM Fortbildungspraktikum „Direktes und indirektes Strangpressen“ in Berlin	20-21.05.2019
Ergebnispräsentation und Diskussion	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch	Jahrestagung des FA Strangpressen der DGM in Mönchengladbach	25-27.09.2019
Ergebnispräsentation und Beratung	Fortschrittsbericht, Diskussion, Festlegung der Arbeitsschritte	3. Sitzung des PA in Braunschweig	20.11.2019
Ergebnispräsentation und Diskussion	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch	Jahrestagung des Fördervereins des Forschungszentrum Strangpressen e.V. in Berlin	05.06.2020
Ergebnispräsentation und Beratung	Fortschrittsbericht, Diskussion, Festlegung der Arbeitsschritte	4. Sitzung des PA (Webmeeting)	30.11.2020
Veröffentlichung / Vortrag	Wissenstransfer in die Wirtschaft, Information der Fachwelt	ESAFORM 2021	14.-16.04.2021
Ergebnispräsentation und Diskussion	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch	Jahrestagung des Fördervereins des Forschungszentrum Strangpressen e.V. in Berlin	06.05.2021
Ergebnispräsentation und Beratung	Fortschrittsbericht, Diskussion, Festlegung der Arbeitsschritte	5. Sitzung des PA (Webmeeting)	30.06.2021
Vortrag	Schulung von Mitarbeitern aus Strangpressbetrieben und Zulieferindustrie	DGM Fortbildungspraktikum „Direktes und indirektes Strangpressen“ in Berlin	21-22.09.2021
Vorlesung „Strangpressen metallischer Werkstoffe“	Wissenstransfer in die Lehre unter Einbeziehung neuester Forschungsergebnisse	Vorlesung im Rahmen des Studiengangs Werkstoffwissenschaften an der TU Berlin	jährlich
Veröffentlichung	Wissenstransfer in die Wirtschaft, Information an die Fachwelt	International Journal „Thin Solid Films“	Einreichung erfolgte am 7.12.2021

- Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Laufzeit
AiF IGF Anschlussantrag	Fortführende Untersuchungen zum Verschleißverhalten der Oberflächenmodifikationen, Versuche auf industriellen Produktionslinien	FZS der TU Berlin, IOT Braunschweig, Wieland Werke AG	Einreichung Frühjahr 2022
Ergebnispräsentation und Diskussion	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch	Jahrestagung des FA Strangpressen der DGM	Frühjahr 2022
Ergebnispräsentation und Diskussion	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch	AK Schwermetall des FA Strangpressen der DGM	Frühjahr 2022
Ergebnispräsentation und Diskussion	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch	AK Forschung des FA Strangpressen der DGM	Frühjahr 2022
Veröffentlichung	Wissenstransfer in die Wirtschaft, Information der Fachwelt	Frontiers in Materials	Winter 2021/2022
Veröffentlichung	Wissenstransfer in die Wirtschaft, Information der Fachwelt	Materials – special issue „Friction and Wear of Materials Surfaces“	Frühjahr 2022
Vorlesung „Strangpressen metallischer Werkstoffe“	Wissenstransfer in die Lehre unter Einbeziehung neuester Forschungsergebnisse	Vorlesung im Rahmen des Studiengangs Werkstoffwissenschaften an der TU Berlin	jährlich
Vortrag	Schulung von Mitarbeitern aus Strangpressbetrieben und Zulieferindustrie	Fortbildungsveranstaltung der Technischen Akademie Esslingen	2 jährig
Veröffentlichungen	Wissenstransfer in die Wirtschaft, Information der Fachwelt	Vorstellung von Zwischenergebnissen auf Tagungen	
Integration in die Lehre	Information von Studierenden, Heranführen von Studierenden an wissenschaftliches Arbeiten	Einbeziehung in Vorlesungsveranstaltungen, Vergabe von Abschlussarbeiten	

### Einschätzung der Realisierbarkeit der Transfermaßnahmen

Das primäre Ziel der Transfermaßnahmen ist die Information der Wirtschaft und Fachwelt über die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse zur Applikation und Anwendung borhaltiger Oberflächenmodifikationen auf Werkzeugen für das Strangpressen von Bunt- und

Schwermetallen. Die Präsentation der geplanten Untersuchungen im Arbeitskreis Schwermetall des Fachausschusses Strangpressen der DGM zu Beginn der Projektlaufzeit wurde seitens der vertretenen Unternehmen begrüßt und hohes Interesse an den Projektergebnissen bekundet. Aufgrund der Corona-Pandemie musste der Großteil der für 2020/2021 anberaumten Sitzungen von Fachgremien und Konferenzen, sowie die damit verbundenen Vorträge zum Projektfortschritt, ausfallen, sodass dieser Transferschritt noch weitestgehend ausstehend ist. Dieses hohe Interesse wird auch durch den geplanten Beitrag der Wieland Werke AG zum Nachfolgeprojekt deutlich. Zur weiterführenden Erforschung des Verschleißwiderstandes der borhaltigen Oberflächenmodifikationen auf Strangpressmatrizen werden dabei unter anderem auch Strangpressversuche im industriellen Maßstab auf Produktionslinien der Wieland Werke AG durchgeführt. Der Forschungsantrag für dieses Nachfolgeprojekt liegt der Forschungsvereinigung Stifterverband Metalle e.V. bereits vor und wird im Frühjahr 2022 für die Begutachtung bei der AiF eingereicht. Hinsichtlich der Applikation der Oberflächenmodifikationen ist festzuhalten, dass bereits während der Projektlaufzeit Borierungen mit den in diesem Projekt ermittelten Parametern und Prozessbedingungen auf den Beschichtungsanlagen der Fa. WEFA Inotec GmbH durchgeführt wurden. Weiterhin bieten die in anderen Anwendungsbereichen etablierten Pastenborierungen der Fa. BorTec GmbH ein zu der Gasphasenborierung alternatives Verfahren für die Aufbringung der Borierung auf die Strangpresswerkzeuge. Die Chancen für eine effektive Weitergabe des in diesem Projekt errungenen Know-hows, sowie dessen erfolgreiche Umsetzung im industriellen Umfeld sind somit als sehr vielversprechend einzuschätzen.